М. А. БЕДРЕКОВСКИЙ
Н. С. КРУЧИНКИН
В. А. ПОДОЛЯН



МИКРО-ПРОЦЕССОРЫ

МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

Основана в 1947 году

Выпуск 1028

М. А. БЕДРЕКОВСКИЙ
Н. С. КРУЧИНКИН
В. А. ПОДОЛЯН

МИКРОПРОЦЕССОРЫ



МОСКВА
«РАДИО И СВЯЗЬ» 1981

ББК 32.97
Б38
УДК 681.325.5—181.48:621.3.049.77

Бедрековский М. А., Кручинкин Н. С., Подолян В. А.
Б38 Микропроцессоры. — М.: Радио и связь, 1981. — 72 с., ил. — (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1028).
50 к.

На основе систематического изложения материалов, отражающих основные свойства и опыт использования отечественных и зарубежных микропроцессоров, показаны их возможности, структура построения, а также особенности применения в конкретных устройствах.
Для широкого круга читателей.

Б $\frac{30502—084}{046(01)—81}$ 215—81Э. 2405000000

ББК 32.97
6Ф7

ПРЕДИСЛОВИЕ

Внимание специалистов различных областей техники все больше привлекают перспективные изделия микроэлектроники — большие интегральные схемы с программно-управляемыми функциями обработки цифровой информации.

Как известно, любая информационная задача в принципе может быть решена путем ее разбиения на отдельные функции обработки информации и выполнения этих функций в определенном порядке, задаваемом программой. Принципиально универсальным элементом интегральной микросхемотехники, реализующим заданный программой процесс решения, является микропроцессор, появившийся в результате эволюционного развития микроэлектронной технологии и стремления обеспечить ее средствами максимальную полноту функциональных свойств элементов вычислительной техники.

Внедрению микропроцессоров в разнообразные промышленные, бытовые и даже радиолюбительские устройства, безусловно, может способствовать описание их возможностей, преимуществ и опыта применения в издании, предназначенном для широкой читательской аудитории. В обширной существующей литературе по микропроцессорам эти вопросы излагаются на профессиональном уровне, как правило, превышающем возможности понимания неспециалистами.

Цель этой брошюры — привлечь к микропроцессорам внимание массового читателя, специальность или интересы которого так или иначе связаны с эксплуатацией или разработкой электронной аппаратуры широкого диапазона применений — от ЭВМ до электробытовых приборов. В брошюре рассмотрены основные элементы структуры микропроцессоров. Описаны организация запоминающих устройств, принципы работы микропроцессорных систем и такие их свойства, как магистральность, возможность прерываний, прямое обращение к памяти, а также сущность микропрограммного управления, языки программирования и др.

Приведены система технических параметров и основные характеристики наиболее массовых типов отечественных и зарубежных микропроцессоров. Дан анализ особенностей их применения, приведены примеры конкретной реализации устройств на их основе.

Стремление к максимальному упрощению, популярности изложения, в ряде случаев в ущерб глубине и строгости, вероятно, может быть оправдано вышеизложенной целью.

Отзывы о книге просим присылать по адресу: 101000, Москва, Главный почтамт, а/я 693, издательство «Радио и связь», редакция Массовой радиобиблиотеки.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

На вопрос анкеты «Каково Ваше личное мнение о микропроцессоре?», предложенной американским журналом «Инструментейшн технолоджи» своим читателям — пользователям и разработчикам средств промышленной автоматики, ответы распределились следующим образом: 53% — «Невероятно, сказочно!», 27% — «Микропроцессоры найдут применение в качестве элементов управления» и 20% — «Мнение не оформилось окончательно, но первое время работать с ними будет трудно» [1].

Краткий анализ этих ответов позволяет сделать один важный и интересный для нас вывод. Насколько первая группа ответов эмоциональна и неконкретна, настолько сдержанны и деловиты вторая и третья. Отсутствие единодушия в этом вопросе становится понятным, если учесть, что на вопрос анкеты «Где Вы используете микропроцессоры в настоящее время?» половина читателей ответила: «Нигде!». Вполне вероятно, что именно эта половина и составила восторженный отзыв.

Правильным будет, по-видимому, считать, что эффективное применение *микропроцессоров (МП)* в действительности сложнее, чем предполагается до приобретения опыта работы с ними, и причина, прежде всего, в отсутствии такого опыта. В то же время идея реализации программируемого цифрового устройства со свойствами *процессора* ЭВМ на минимальном количестве *больших интегральных схем (БИС),* заложенная в МП, бесспорно, наиболее перспективна.

Давая оценку современному состоянию разработки и внедрения МП, а также перспективам ближайшего будущего, за рубежом нередко говорят о «второй компьютерной революции», «взрыве в технике обработки информации», «нашествии микро-ЭВМ» и т. п., подчеркивая взрывообразный характер и большое значение проникновения МП во все сферы жизни.

Согласно прогнозам западногерманской фирмы «Сименс А. Г.» количество выпускаемых в Западной Европе БИС с программируемой логикой работы в 1980 году составит 20%, а в 1985 году — около 40% общего годового выпуска интегральных схем (ИС) [2]. В США сбыт только кристаллов МП удваивается каждые два года, причем насыщения их рынка, по крайней мере в обозримой перспективе, не предвидется, поскольку еще быстрее растут необходимость и возможность освоения микропроцессорами новых сфер применения.

В чем же причина столь стремительного вторжения МП в жизнь? Главная причина заключается в объединении микропроцессором универсальных возможностей программируемого вычислительного средства с преимуществами технологии БИС — относительно низкой стоимостью, высокой надежностью и экономичностью. Следствием этого является замечательная возможность создавать как исключительно «гибкие» микропроцессорные БИС (МП БИС), направленные на решение с большей или меньшей эффективностью наиболее широкого диапазона задач, так и узко специализированные МП БИС, наиболее эффективно решающие одну или несколько задач, специфичных для некоторых применений.

В качестве примера можно привести БИС отечественного микропроцессора серии К587 — арифметического устройства (АУ), выполняющего функции универсального процессора, и арифметического расширителя (АР) — процессора, ориентированного на быстрое умножение и некоторые другие операции.

Таким образом, специализация МП БИС или, наоборот, их универсальность должны рассматриваться в первую очередь при определении эффективной сферы их применения. При этом следует иметь в виду, что большая группа задач

может быть наиболее эффективно решена путем объединения функций универсального МП и специализированных МП БИС, распределения частей общего алгоритма решения между соответствующими специализированными МП БИС и обработки их результатов универсальным МП. Эта идея положена в основу ряда лучших отечественных и зарубежных *микропроцессорных комплектов* (МПК), в которых состав БИС помимо информационно-логической электрической и конструктивной совместимости в той или иной степени удовлетворяет также требованию функциональной полноты, степень которой, очевидно, и определяет универсальность применения МПК.

Диалектическое единство общего и частного, универсального и специального, реализованное в ряде МПК, послужило научной основой создания идеологии отечественной Единой Системы Микропроцессорных Комплектов (ЕС МПК) — унифицированного ряда МПК, отличающихся быстродействием и технологией изготовления [3].

Функциональная полнота комплектов обеспечивается составом из 15—30 БИС, имеющих структуру универсального или специального процессора и ориентированных на эффективное решение различных задач.

Количество типов МПК, выпускаемых за рубежом, давно превысило сотню, причем существует много комплектов примерно равной производительности и функционального состава, отличающихся лишь формально, но несовместимых по основным характеристикам структуры и программным средствам. В связи с этим именно на первых этапах освоения особое значение приобретает выработка единых принципов построения МПК, направленных на исключение повторяемости и непомерное увеличение их номенклатуры. Отрадно отметить своевременный подход к решению этого вопроса советскими специалистами и их ведущую роль в создании единой системы, обеспечивающей наряду с действительной универсальностью выполнение требований унификации МПК.

Общий вид некоторых БИС ЕС МПК показан на рис. 1.

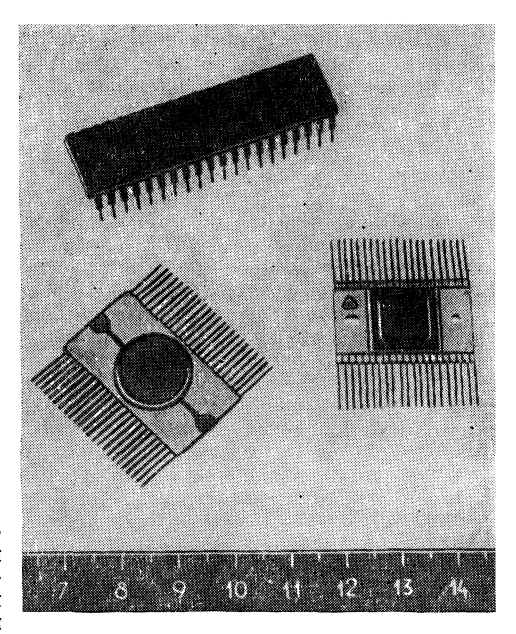


Рис. 1. Большие интегральные схемы

Вместе с тем необходимо отметить существование ограничений, делающих невозможными или нецелесообразными построение и использование систем на базе МПК в ряде случаев.

Микропроцессорные системы проигрывают перед системами, реализованными на непрограммируемой («жесткой») логике, в случае необходимости обеспечения высокой скорости обработки информации (1 млн. операций/с и выше). Также нецелесообразным считается применять МП БИС для построения систем невысокой сложности, т. е. таких, которые могут быть спроектированы на нескольких десятках ИС «жесткой» логики малой степени интеграции. В этом случае проектирование оказывается проще, занимает меньше времени и может быть выполнено традиционными методами.

Надо заметить, что методы проектирования систем на базе МПК коренным образом отличаются от традиционных методов логического проектирования, которыми пользуются разработчики систем на ИС.

В распоряжении разработчика системы на ИС имеются разнообразные *логические элементы*, каждый из которых выполняет, как правило, одну или небольшой, но неизменный набор логических функций, таких как И, ИЛИ, НЕ

в различных сочетаниях и др. Логическое проектирование в этом случае заключается в нахождении определенных физических связей между этими элементами, в результате установления которых получается структура с требуемыми логическими функциями.

При проектировании систем на МП БИС этот метод не может быть применен, поскольку разработчик имеет дело с элементами, функции которых многообразны и определяются *системой команд,* присущей каждой данной МП БИС, т. е. задаются программным путем. Поэтому задача проектирования МП системы сводится в основном к программированию ее функциональных свойств, а собственно физических структур на базе одного комплекта МП БИС может быть ограниченное количество, и разработка их может проводиться разработчиками МПК одновременно с созданием самих МП БИС. Из этого следует, что эффективное проектирование МП систем требует специальной подготовки и особых технических средств, обеспеченных специальными рабочими программами.

Только такой подход к проектированию позволяет реализовать возможности МП БИС по сокращению времени и затрат на разработку МП систем, их «гибкости», т. е. адаптируемости к широкому кругу задач, оптимизации по быстродействию для данной задачи, а при разработке сложных систем этот подход является единственно возможным.

Свойства и характеристики МП рассматриваются далее с точки зрения возможности применения МП с наибольшей эффективностью в различных МП системах. При этом используется общепринятая в вычислительной технике и микроэлектронике терминология, почти полностью и без изменений применимая к МП. Вводимые понятия, как правило, подробно определены в тексте. Ниже в алфавитном порядке приводятся краткие определения встречающихся в тексте терминов, составленные на основании анализа и обобщения большого количества литературных данных.

Адрес — указание местоположения ячейки памяти в запоминающем устройстве.

Аккумулятор, накапливающий регистр — регистр, сохраняющий результаты предыдущих операций для использования их в последующих операциях.

Алгоритм — набор предписаний, однозначно определяющий содержание и последовательность выполнения операций для решения определенной задачи в виде пошаговой процедуры.

Ассемблер, программа ассемблер — обслуживающая программа, которая преобразует символические инструкции на языке ассемблера в команды машинного языка, а также выполняет некоторые вспомогательные функции.

Большая интегральная схема (БИС) — интегральная схема, содержащая от 100 до 10 000 логических элементов.

Двоичный код — код для представления данных, записываемый в виде ряда 0 и 1. Наличие многих физических аналогов (включено — выключено, «+» — «—» и др.) делает удобным применение его в цифровой технике.

Дисплей — устройство преобразования двоичной информации в визуальное изображение и (или) обратно (цифровой индикатор, индикатор на электронно-лучевой трубке, графический терминал).

Интегральная схема (ИС) — электронная схема, изготовленная на поверхности или в объеме полупроводникового кристалла и содержащая два компонента или более (транзисторов, резисторов).

Интерфейс — комплекс средств унифицированного сопряжения между составляющими частями (подсистемами) системы обработки данных, включающий аппаратные средства и протокол, т. е. совокупность правил, устанавливающих единые принципы взаимодействия подсистем.

Команда, инструкция — единичный шаг работы исполнительного устройства, представленный в виде предписания на машинном языке. Команда определяет подлежащую выполнению операцию и ее атрибуты.

Компилятор — обслуживающая программа преобразования рабочей программы, представленной на одном из языков высокого уровня, в форму на уровне машинного языка с сохранением логической структуры программы.

Кросс-программное обеспечение — набор программ для создания и отладки программного обеспечения ЭВМ, отличной от той, на которой готовится это программное обеспечение.

Логический элемент (вентиль) — элементарная схема, реализующая переключательную функцию и имеющая два логических состояния.

Магистраль — универсальная шина для обмена информацией между различными элементами структуры МП, МП системы, периферийными устройствами.

Микропрограммное управление (МПУ) — способ управления, при котором каждая команда представляется в виде набора микрокоманд, т. е. реализуемых аппаратно элементарных машинных операций.

Микропроцессор (МП) — центральный процессор, реализованный средствами интегральной технологии в одной или нескольких больших интегральных схемах.

Микропроцессорный комплект, комплект МП БИС — набор совместимых БИС для построения микропроцессоров и микропроцессорных систем.

Микропроцессорная система (МП система) — совокупность микропроцессорных устройств обработки, памяти и ввода/вывода, используемых для реализации единого процесса преобразования информации. Включает также специальное программное обеспечение для организации совместной работы и управления указанными устройствами.

Мини-ЭВМ — малая вычислительная машина, имеющая широкое применение благодаря малым габаритам и стоимости. Длина слова — от 8 до 18 разрядов, чаще всего — 16.

Операнд — исходный элемент данных, над которыми выполняется операция.

Отладка — процесс обнаружения, локализации и устранения программных ошибок и аппаратных сбоев.

Периферийное оборудование — устройства, используемые для ввода и вывода данных из ЭВМ, организации промежуточного хранения данных и как внешняя память.

Пользователь — по отношению к МП — разработчик МП системы, по отношению к МП системе — тот, кто занимается ее эксплуатацией.

Программа — последовательность предписаний, определяющая порядок выполнения операций при реализации заданного алгоритма.

Процессор — устройство запрограммированной обработки информации в ЭВМ.

Регистр — накопитель на переключающих элементах (например, на триггерах), емкость которого обычно равна одному машинному слову. Предназначен для хранения информации в процессе обработки данных в ЭВМ.

Регистр общего назначения (РОН) — программно-доступный рабочий регистр процессора, который может быть использован для оперативного хранения различных элементов программы.

Резидентное программное обеспечение — набор программ для создания и отладки программного обеспечения той ЭВМ, на которой готовится это обеспечение.

Система команд — полный набор всех команд, допустимых в машинном языке данной МП системы или части ее структуры.

Таймер, тактовый генератор — генератор тактовых импульсов, обеспечивающий синхронную работу всех частей структуры МП системы.

Терминал — выносной клавишный пульт для обмена данными с МП системой.

Триггер — электронная логическая схема, принимающая одно из двух возможных устойчивых состояний, соответствующих 0 и 1.

Центральный процессор — центральное устройство ЭВМ или вычислительной системы, включающее арифметическое устройство, устройство управления и рабочие регистры. Осуществляет наряду с обработкой данных управление другими устройствами ЭВМ или системы (например, периферийными средствами).

Шина (данных, адресов, управления) — линия связи одного или нескольких источников с одним или несколькими приемниками информации.

Язык ассемблера — язык программирования низкого уровня, структура элементов которого соответствует форматам команд и данных машинного языка.

Язык программирования — формализованный язык, предназначенный для написания программ в виде, воспринимаемом вычислительной машиной.

Ячейка памяти — регистр в памяти ЭВМ, доступ к которому возможен по определенному адресу.

Глава первая

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ МИКРОПРОЦЕССОРОВ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

1. Основные элементы структуры микропроцессора

Общая структура МП мало чем отличается от структуры процессора ЭВМ небольшой производительности класса так называемых *мини-ЭВМ,* к которому относятся, например, отечественные машины М6000, СМ-2 или СМ-3. Таким образом, зная, как устроена машина, составить представление о работе МП весьма несложно. Однако знания такого рода, умение свободно обращаться с МП, а в конечном итоге — эффективно применять их, уже сейчас необходимы гораздо более широкому кругу людей, чем круг специалистов по вычислительной технике. По-видимому, в недалеком будущем не найдется специальности, связанной с эксплуатацией электронной техники, которая не требовала бы знания МП.

Поэтому для большинства читателей этой брошюры первое знакомство с МП может послужить поводом к более глубокому изучению МП техники, что поможет приобщиться к ее использованию.

Способность к программированию последовательности выполняемых функций, т. е. способность работать по заданной *программе,* является главным отличием МП от элементов «жесткой» логики, таких как ИС малой и средней степени интеграции, и накладывает определенные условия на его организацию Прежде всего кроме физической структуры, называемой аппаратными средствами и образующей «тело» МП, существуют программные средства, воплощающие, так сказать, его «духовное» начало.

Понятно, что между такой «душой» и таким «телом» существует теснейшая взаимосвязь, и только предельное упрощение и схематичность изложения позволяют здесь рассматривать их отдельно.

Итак, в самом общем виде аппаратные средства МП, повторяя структуру *центрального процессора* мини-ЭВМ, включают в себя арифметическо-логическое устройство (АЛУ), устройство управления (УУ) и несколько рабочих *регистров* (Р). Микропроцессор может содержать от одного до нескольких кристаллов, по которым его структура рассредоточена по признаку выполняемых функций (например, АЛУ и Р на одном кристалле, а УУ на другом) и (или) по признаку разрядности (например, по 2 разряда АЛУ и Р на каждом из четырех кристаллов и 8 разрядов УУ на пятом кристалле образуют пятикристальный 8-разрядный МП).

Отсюда вытекает достаточно устоявшееся к настоящему времени определение МП как центрального процессора, реализованного средствами интегральной технологии в одной или нескольких БИС.

Это определение содержит несколько важных моментов, которые нуждаются в комментариях. Во-первых, оно отражает аппаратурные свойства МП как процессора и элементные свойства как интегральной схемы. Действительно, появление первых МП — это результат предельного упрощения структуры центрального процессора ЭВМ до уровня, который мог быть реализован средствами микроэлектроники при достигнутом к тому времени уровне интеграции.

Во-вторых, данное определение позволяет считать микропроцессором только потенциально универсальный элемент обработки информации, т. е. такой элемент, набор программно-управляемых функций которого позволяет реализовать принципиально любой заданный алгоритм, поскольку это одно из основных требований к центральному процессору ЭВМ.

В-третьих, определение дает необходимый состав элементов структуры МП, который согласно определению центрального процессора включает АЛУ, УУ и Р.

Кроме того, в составе МП, т. е. в физическом объединении с ним, могут быть устройство ввода/вывода (УВВ) для обмена информацией между МП и другими устройствами, а также генератор тактовых импульсов *(таймер)* и некоторые другие элементы структуры (рис. 2).

Сигналы трех видов — информационные, адресные и управляющие — могут передаваться по одной, двум или трем *шинам.* Шина представляет собой группу линий связи, число которых определяет разрядность одновременно передаваемой по шине двоичной информации от одного или нескольких источников к одному или нескольким приемникам. Шины, как правило, двунаправленные, т. е. могут передавать информацию в обоих направлениях.

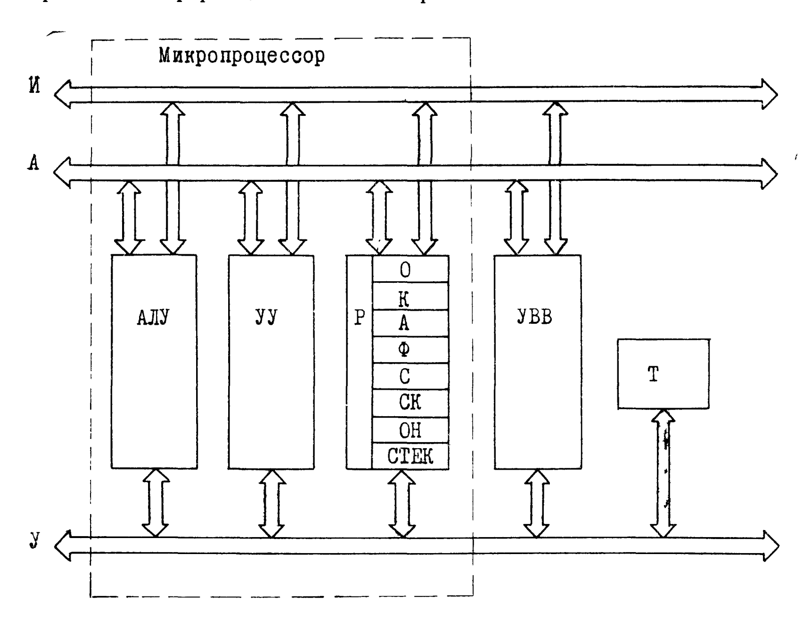


Рис. 2. Обобщенная структурная схема МП с тремя раздельными шинами информационных (И), адресных (А) и управляющих (У) сигналов.

АЛУ — арифметико-логическое устройство; *УУ* — устройство управления; *УВВ* — устройство ввода/вывода; *Т* — таймер; *Р* — рабочие регистры: *О* — операндов, *К* — команд, *А* — адресов, *Ф* — флаговые, *С* — состояний, *СК* — счетчика команд, *ОН* — общего назначения, *СТЕК* — стековые.

Проводя аналогию с живым организмом, систему шин в МП можно сравнить с нервной системой, причем, если процессы в информационных и адресных шинах схожи с рефлекторной деятельностью, то процессы в управляющей шине, скорее, похожи на деятельность более высокого уровня — на психику.

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) совершает различные арифметические и логические операции над числами и адресами, представленными в двоичном коде. Действительно, состав таких операций определен списком инструкций (набором команд) АЛУ, составляющих «строительный материал» — основу программных средств для МП в целом.

В набор команд АЛУ входят, как правило, арифметические и логические сложения и умножения, сдвиги, сравнения и т. п. Арифметические операции выполняются в соответствии с правилами двоичной арифметики, которые в принципе ничем не отличаются от обычных правил сложения, умножения, переноса и других правил в десятичной системе. Логические операции происходят по правилам Булевой алгебры (алгебры логики), с которыми, при желании, читатель может познакомиться, например, в [4].

Структура АЛУ достаточно сложна, но не содержит никаких уникальных или специфичных элементов, наоборот, она использует сумматор по модулю 2, сдвигатели, регистры и другие элементы, широко распространенные в «жесткой» логике.

Устройство управления управляет работой АЛУ и всех других элементов структуры МП.

В УУ поступающие из памяти команды преобразуются в двоичные сигналы, непосредственно воздействующие на все элементы структуры и стимулирующие выполнение данной команды. Кроме того, УУ, синхронизируемое таймером, распределяет процесс выполнения команды во времени. Команда представляет собой двоичное слово из 8, 16, 24 разрядов и более (до 64), часть которых представляет код операции, а остальные распределены между адресами *операндов* в памяти. На рис. 3 показано 24-разрядное командное слово с семиразрядным кодом операции и двумя восьмиразрядными *адресами.*

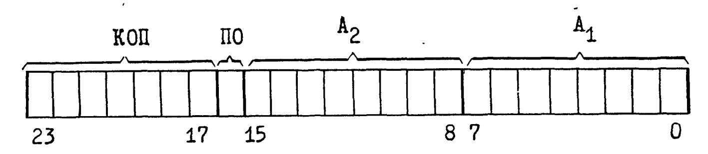


Рис. 3. 24-разрядное командное слово.
Разряды: 17—23 — код операции (КОП); 16 — признак операнда (ПО); 8—15— адрес второго операнда (A_2); 0—7 — адрес первого операнда (A_1).

Команда с 16-разрядной адресной частью позволяет обращаться к $2^{16}-1=$ $=65\,635$ *ячейкам памяти* (единицу пришлось вычесть, так как математический адрес из шестнадцати нулей не соответствует физической ячейке), и этого количества, как правило, вполне достаточно для задач, решаемых МП в составе МП системы. Такое обращение к памяти называется прямой адресацией и применяется реже, чем косвенная адресация, которая необходима, когда разрядность адресной части меньше, чем требуется. В этом случае адресация проводится в два этапа: на первом этапе по адресу, содержащемуся в команде, выбирается ячейка, содержащая адрес другой ячейки, из которой на втором этапе выбирается операнд. Команда при косвенном методе адресации должна содержать один разряд признака операнда, состояние которого определяет, что выбирается на данном этапе: адрес операнда или сам операнд? Конечно, косвенный способ адресации медленнее прямого. Он позволяет за счет наращивания объема памяти адресов обращаться к числу операндов в 2^n раз большему, чем при прямом способе (n — разрядность адресной части команды).

Устройство управления любую операцию, согласно коду, заданному командным словом, распределяет на последовательность фаз — фазы адресации и фазы выполнения, называемую циклом. Из-за ограниченной разрядности МП действия над операндами большой разрядности могут выполняться за два цикла и более. Очевидно, что это в 2 раза и более снижает быстродействие МП. Отсюда следует интересный и практически важный вывод: быстродействие МП находится в обратной зависимости от точности, однозначно определяемой разрядностью операндов (см. § 9).

Фаза адресации начинается с обращения по адресу, содержащемуся в регистре адреса *А*, в память данных, выполняемого, как уже отмечено, прямым или косвенным способом, и заканчивается заполнением регистров двух операндов *О* (см. рис. 2).

В ходе фазы выполнения в *АЛУ* согласно коду операции совершается действие над операндами, считываемыми из регистров *О*, после чего результат записывается в один из регистров *О*, называемый *аккумулятором.* Содержимое аккумулятора, являясь промежуточным результатом, либо используется непосредственно в операции по следующей команде, либо отсылается по этой команде в *регистр общего назначения ОН,* где хранится до необходимости его использования в ходе выполнения программы.

Все операции по распределению информационных, адресных и управляющих сигналов между элементами структуры МП, памятью и *периферийными устройствами* осуществляются с помощью устройства ввода/вывода УВВ. Устройство ввода/вывода представляет собой специализированный МП, называемый также контроллером ввода/вывода или интерфейсным устройством, и может быть совмещено на одном кристалле с собственно МП или же занимать отдельный кристалл или несколько кристаллов. УВВ имеет свою систему команд, т. е.

также управляется программой и выполняет функции своеобразного «органа чувств» МП, осуществляя его связь с внешним миром.

Стремление к уменьшению количества выводов и увеличению полезной площади кристалла приводит к необходимости сокращать количество внутренних линий связи и контактных площадок, занимающих значительную часть поверхности кристалла. Это удается сделать путем преобразования параллельного, т. е. существующего и передаваемого одновременно, многоразрядного *двоичного кода* в последовательный, т. е. во временную последовательность сигналов, каждый из которых соответствует одному из разрядов исходного кода, что позволяет передавать эту последовательность по одной линии. Передаваемые сигналы заполняют группу входных регистров приемника информации таким образом, что с приходом последнего образуют исходный параллельный код, т. е. происходит обратное преобразование. Такой способ передачи многоразрядной информации называется мультиплексированием.

Мультиплексирование — вынужденная мера, вызванная необходимостью сокращения линий связи, ограничивающая скорость выполнения команд ввода/вывода информации, причем тем сильнее, чем больше разрядность передаваемых данных.

Рабочие регистры МП физически представляют собой одинаковые ячейки памяти, служащие для сверхоперативного хранения текущей информации (часто их объединяют одним названием — сверхоперативное запоминающее устройство — СОЗУ), однако по выполняемым функциям они разбиты на группы, связанные с определенными элементами структуры МП.

Регистры операндов *О* в течение времени выполнения операции в АЛУ хранят два двоичных числа, одно из которых по окончании операции заменяется результатом, т. е. как бы накапливается, отсюда и название регистра «аккумулятор» — накопитель. Содержимое второго регистра операндов заменяется в следующей операции другим операндом, в то время как содержимое аккумулятора может быть сохранено по ряду специальных команд.

Регистр команд *К* хранит несколько разрядов командного слова, представляющих код выполняемой операции, в течение времени ее выполнения. Адресная часть командного слова содержится в регистре адреса *А*. После выполнения какой-либо операции разрядность результата может оказаться больше разрядности каждого из операндов, что регистрируется состоянием специального флагового регистра, иногда называемого *триггером* переполнения. В процессе отладки составленной программы программист следит за состоянием флагового регистра и в случае необходимости устраняет возникшее переполнение.

Очень важными в системе команд МП являются команды переходов к выполнению заданного участка программы по определенным признакам и условиям — так называемые команды условных переходов. Наличие таких команд определяет уровень «интеллектуальности» МП, так как характеризует его способность принимать альтернативные решения и выбирать различные пути в зависимости от возникающих в ходе решения условий. Для определения таких условий служит специальный регистр состояний С, фиксирующий состояние МП в каждый момент выполнения программы и посылающий в УУ сигнал перехода к команде, адрес которой содержится в специальном регистре, не совсем удачно называемом счетчиком команд СК. Дело в том, что команды в памяти записываются в определяемой программой последовательности по адресам, образующим натуральный ряд, т. е. адрес следующей команды отличается от адреса предыдущей на единицу. Поэтому при выполнении непрерывной последовательности команд адрес следующей команды получается путем прибавления к содержимому СК единицы, т. е. образуется в результате счета. Однако назначение СК заключается не столько в определении количества выполненных команд, как может показаться из его названия, сколько в нахождении необходимых адресов команд, причем при наличии в программе команд перехода следующая команда может не иметь следующего по порядку адреса. В таком случае в СК записывается адресная часть команды перехода.

Регистры ОН используются для хранения промежуточных результатов, адресов и команд, возникающих в ходе выполнения программы, и могут связываться по общим шинам с другими рабочими регистрами, а также со счетчиком команд и УВВ. Число регистров ОН в МП обычно не превышает 10—16 разрядностью 2—8 бит каждый и в некоторой степени служит косвенным показа-

телем вычислительных возможностей МП. Программист может использовать эти регистры, обращаясь к ним по адресам, для записи или извлечения и передачи информации элементам структуры МП и в память.

Особый интерес представляет наличие у многих моделей МП группы регистров, имеющих магазинную или стековую организацию — так называемый стек. Стек позволяет без обмена с памятью организовывать правильную последовательность выполнения различных по старшинству арифметических действий (скобка старше умножения, умножение старше сложения и т. п.).

Организация стека аналогична устройству магазина винтовки: патрон, помещенный в магазин первым, выстрелит последним. Операнд или другая информация может посылаться в стек без указания адреса, поскольку каждое слово, помещаемое в стек, занимает сначала первый регистр, а затем «проталкивается» последующими словами каждый раз на регистр глубже. Выводится информация в обратном порядке, начиная с первого регистра, в котором хранится слово, посланное в стек последним, при этом последние регистры очищаются.

Заполняется стек до появления в первом разряде команды младшей или равной по отношению к командам, находящихся в стеке. Появление такой команды служит сигналом возможности выполнения всей последовательности. Количество регистров или уровней («глубина») стека — важная характеристика структуры МП.

Глубина стека может быть значительно увеличена за счет организации его не в самом МП, как это сделано в приведенном выше описании, а в памяти. В таком случае в Р размещается регистр указателя стека, содержание которого определяет адрес соответствующих ячеек памяти в оперативном запоминающем устройстве. От разрядности этого адреса зависит наибольшее число уровней или глубина стека.

В состав МП может входить таймер *Т*, использующий навесной времязадающий конденсатор или кварцевый резонатор. Таймер — сердце МП, поскольку его работа определяет динамику всех информационных, адресных и управляющих сигналов и синхронирует работу УУ, а через него и других элементов структуры. Частота синхронизации, называемая тактовой частотой, выбирается максимальной и ограничивается только задержками прохождения сигналов, определяемыми в основном технологией изготовления БИС. Скорость выполнения микропроцессором программы прямо пропорциональна тактовой частоте.

2. Организация памяти. Структура и принципы работы микропроцессорной системы

В § 1 были вкратце описаны основные элементы структуры МП, его аппаратные средства. Из этого описания хорошо видно, что МП не может работать без обращений к памяти за командными словами или к организованному там стеку. Однако функции памяти, определяющие структуру и организацию запоминающих устройств (ЗУ), не ограничиваются посылкой в МП команд и содержания стековых регистров, а являются гораздо более широкими.

Запоминающие устройства могут быть классифицированы по характеристикам и характеру выполняемых функций. На рис. 4 представлена схема такой классификации.

Все ЗУ можно разбить на два основных класса — внешние ЗУ, имеющие, как правило, большую емкость и невысокое быстродействие, и внутренние, т. е. конструктивно совмещенные с вычислительным устройством, относительно небольшой емкости, достаточно быстродействующие и выполненные по полупроводниковой технологии.

Внешние ЗУ являются энергонезависимыми, т. е. способность к хранению информации у них заложена в структуре носителя. Такими носителями могут быть перфокарты, перфоленты, магнитные барабаны, ленты и диски. Информация в них заносится программистом и может накапливаться, образуя библиотеки различных программ в виде физических единиц. Наличие и полнота таких библиотек — важный фактор, определяющий возможность широкого применения вычислительных систем.

Внутренние ЗУ занимают нижнюю ступень в многоуровневой структуре памяти машины. Такая организация очень похожа на память человека, в кото-

рой тоже можно выделить два уровня — «долгую» память, почти не стираемую в течение жизни, относительно медленную из-за большого объема (вспомним выражение «покопаться в памяти») и «короткую» память, содержимое которой оперативно используется и обновляется, а объем невелик. Эта аналогия прослеживается и дальше, иллюстрируя эволюцию организации ЗУ как сознательное, а чаще всего эвристическое приближение к принципам, выработанным природой.

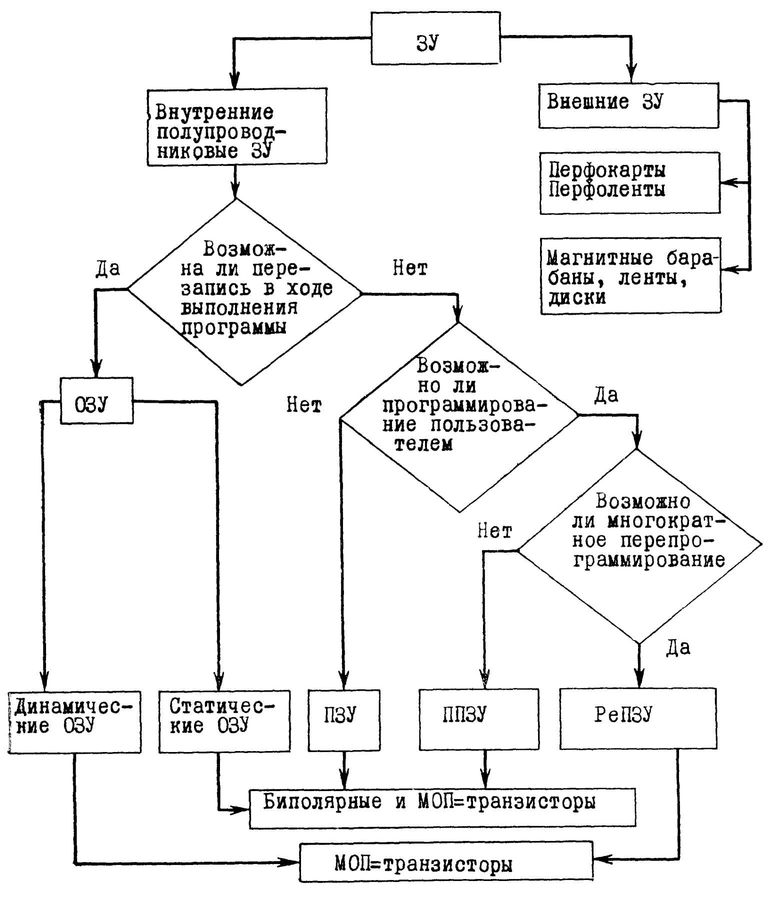


Рис. 4. Классификационная схема запоминающих устройств.

Полупроводниковые ЗУ подразделяются на оперативные и постоянные.

Группа оперативных запоминающих устройств (ОЗУ) позволяет записывать информацию и считывать ее в процессе выполнения программы. Одна и та же ячейка может использоваться в разное время для хранения различной информации. Другая группа полупроводниковых ЗУ работает только на считывание, причем в ходе программы содержимое всех ячеек остается неизменным. Такие ЗУ либо программируются раз и навсегда изготовителем и относятся к постоянным запоминающим устройствам (ПЗУ), либо допускают возможность записи в них информации с помощью специальных устройств пользователем и относятся к программируемым постоянным ЗУ (ППЗУ).

Запись информации в ППЗУ основана на необратимых процессах и осуществляется пережиганием в биполярных или МОП-транзисторных ячейках оми-

ческих перемычек или, наоборот, замыканием ячеек путем маскированного напыления проводников (технологии изготовления БИС рассмотрены в § 4). ППЗУ также может быть выполнено на основе специальной МОП-структуры. В этом случае запись информации производится электрическим способом за счет накопления статического заряда на кремниевом включении, изолированном со всех сторон окислом и играющем роль изолированного затвора с отпирающим потенциалом. Структура такой ячейки показана на рис. 5.

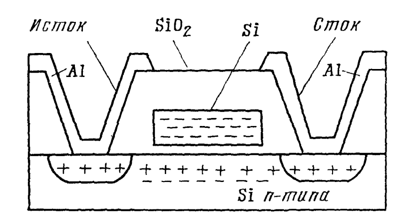


Рис. 5. Структура *n*-МОП ячейки ППЗУ с накоплением статического заряда.

Отрицательный заряд, образованный в изолированном участке кремния, образует за счет индукции положительную область в канале *n*-типа, обеспечивая открывание МОП-транзистора. Стекает заряд очень долго, так как проводимость изолирующего окисла исчезающе мала. Существующие ППЗУ такого типа хранят однажды записанную информацию около 10 лет.

В другом случае программирование ППЗУ осуществляется путем пережигания перемычек в цепях эмиттеров биполярных транзисторов (рис. 6,*а*). Оба способа требуют применения специального оборудования.

Репрограммируемые ПЗУ (РеПЗУ) позволяют несколько раз стирать и вновь записывать информацию с помощью ультрафиолетового облучения ячеек, показанных на рис. 5, непосредственно, т. е. методами проекционной литографии, или через специально изготовленную маску. К недостаткам таких РеПЗУ следует отнести значительные технологические трудности и сложность оборудования для перезаписи информации. К тому же количество перезаписей ограничено в результате изменения электрических параметров ячеек.

Оперативные запоминающие устройства бывают статического и динамического типа. В первых хранение двоичной информации обусловлено одним из двух устойчивых состояний *триггера,* выполненного на биполярных или МОП-транзисторах (рис. 6, *б*, *в*). В динамических ОЗУ информация хранится за счет заряда паразитной емкости МОП-транзистора ($C_{экв}$, рис. 6,*г*), равной приблизительно 1 пФ, в течение времени ее разряда через сопротивление утечки, составляющее сотни мегаом.

Для восстановления информации она считывается и перезаписывается в ту же ячейку, откуда считана, с периодом, меньшим, чем время разряда. Этот процесс обеспечивает специальная схема регенерации. Использование динамического ОЗУ несколько снижает общее быстродействие, поскольку на время регенерации работа МП приостанавливается.

В § 1 отмечалось, что время цикла МП системы, от которого в значительной степени зависит быстродействие, может определяться как самим МП, так и памятью, а точнее, ее основной характеристикой — временем обращения. В подавляющем большинстве случаев именно время обращения вносит наибольший вклад в продолжительность цикла, поэтому повышение быстродействия ЗУ в настоящее время считается одним из главных путей увеличения скорости выполнения операций.

Кроме времени обращения важными характеристиками ЗУ следует считать информационную емкость, потребляемую мощность и стоимость.

В табл. 1 приведены значения этих характеристик для различных ЗУ.

Наибольшее быстродействие, как следует из табл. 1, обеспечивают биполярные статические ОЗУ, однако они и наименее емкие и по мощности, потребляемой одной ячейкой, превосходят все остальные виды ЗУ. Это обусловливает их применение для оперативного хранения данных, адресов и управляющих сигналов в небольших МП системах, обрабатывающих относительно малые объемы информации по коротким программам.

Динамические ОЗУ медленнее статических, так как выполнены на базе МОП-технологии, которая вообще проигрывает по быстродействию перед биполярной. Особенностью динамических ОЗУ является принципиальная невозможность работы в асинхронном режиме, что требуется при отладке программ путем их пошаговой реализации. Однако преимущества большой информаци-

онной емкости и малой мощности потребления позволяют широко использовать динамические ОЗУ в больших МП системах.

Биполярные и МОП ПЗУ применяются для хранения констант, программ, подпрограмм стандартных преобразований (таких как sin, ln, таблица умножения, преобразование кодов и др.), дешифрации кодов команд в последова-

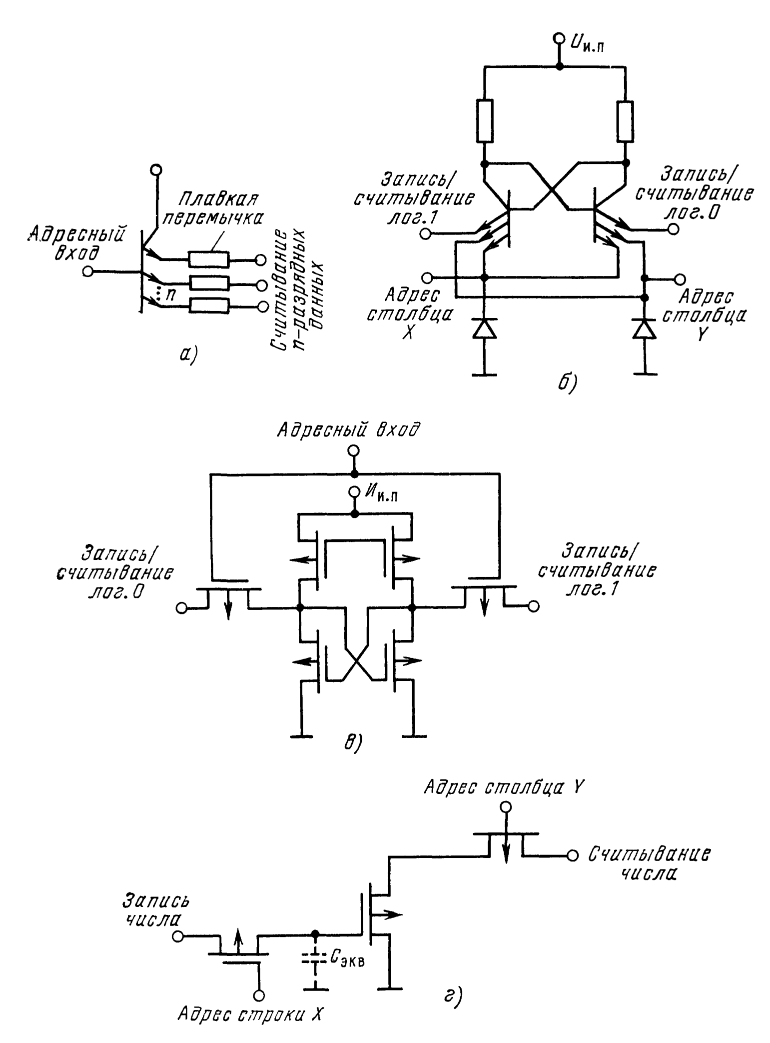


Рис. 6. Принципиальные электрические схемы запоминающих ячеек полупроводниковых ЗУ.

а — ячейка ПЗУ на биполярных транзисторах с записью информации путем пережигания плавких перемычек; *б* — статическая биполярная ячейка ОЗУ; *в* — статическая ячейка ОЗУ на МОП-транзисторах; *г* — динамическая ячейка ОЗУ на МОП-транзисторах.

тельность микрокоманд, а микрокоманд в последовательность микроопераций, а также для организации на базе полупроводниковых ячеек различных комбинационных схем, таких как таймер, буферные схемы и пр.

Биполярные ПЗУ отличаются от МОП более высоким быстродействием и большей потребляемой мощностью.

Таблица 1

Характеристики полупроводниковых ЗУ

Технология изготовления	Вид ЗУ	Время обращения, нс	Информационная емкость, бит/кристалл	Мощность потребления, мВт/бит	Относительная стоимость
Биполярная	Статические ОЗУ	30—100	64—1 К	5—0,5	Высокая
	ПЗУ	50—150	⩽16 К	0,5—0,05	Низкая
	ППЗУ	50—150	⩽4 К	0,5—0,05	Низкая
МОП	Статические ОЗУ	200—500	256—1 К	0,01—0,3	Средняя
	Динамические ОЗУ	500	⩽4 К	0,2—0,3	Средняя
	ПЗУ	350—1800	⩽16 К	0,01—0,1	Низкая
	ППЗУ и РеПЗУ	300	⩽16 К	<0,1	Высокая

ППЗУ и РеПЗУ необходимы там, где требуются модификация или исправление программ.

Типичное распределение информации в зависимости от ее характера между внешней памятью, ПЗУ и ОЗУ приводится в табл. 2

Таблица 2

Типовое распределение информации в зависимости от ее характера между внешней памятью, ПЗУ и ОЗУ

Вид ЗУ	Содержание хранимой информации
Внешнее ЗУ	Программы, вводимые оператором, состоящие из последовательности адресов соответствующих команд и данных в ПЗУ
ПЗУ, ППЗУ, РеПЗУ	Константы, система команд (микрокоманд), стандартные преобразования, организатор прерываний
ОЗУ	Последовательности адресов команд данной программы в ПЗУ, записанные из внешнего ЗУ, промежуточные данные, стек, буферы для связи и обмена с внешними устройствами

Вся информация, хранимая в ЗУ, составляет программное обеспечение МП системы, которое рассмотрено в § 7, здесь же остановимся на структуре МП системы, а также опишем некоторые принципы, на которых основана ее организация.

В отличие от собственно микропроцессора МП система уже «умеет» обрабатывать информацию, т. е. в результате вычислительного процесса по заданной программе над входными данными получать необходимый результат. Обязательными элементами МП системы поэтому являются ПЗУ, ОЗУ и *интерфейсные* схемы. Кроме того, в состав МП системы могут входить внешнее ЗУ, а также различные периферийные устройства (рис. 7).

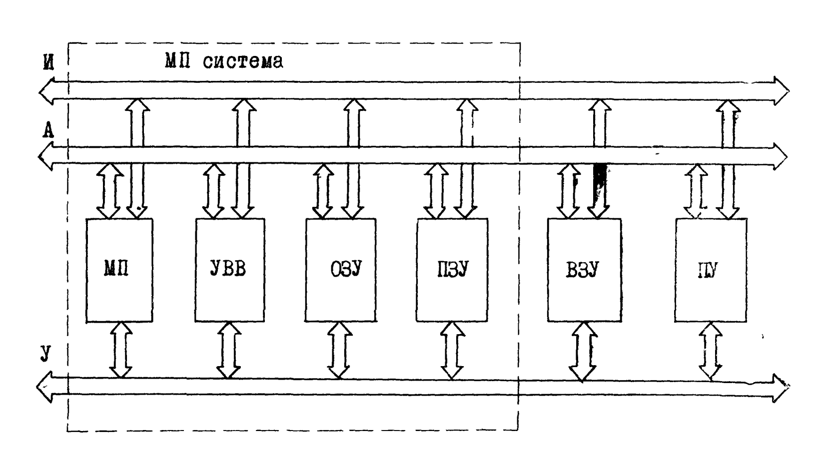


Рис. 7. Обобщенная структурная схема микропроцессорной системы.
МП — микропроцессор; УВВ — устройство ввода/вывода; ОЗУ, ПЗУ и ВЗУ — оперативное, постоянное и внешнее запоминающее устройства соответственно; ПУ — периферийное устройство.

Связь элементов структуры МП между собой, а также связь их с ОЗУ, ПЗУ и периферийными устройствами осуществляется через интерфейс.

Из общего определения интерфейса, приведенного во введении, следует, что это понятие включает в себя аппаратные средства для обмена данными между частями системы и протокол, описывающий принципы взаимодействия частей системы в ходе обмена данными.

В случае МП системы аппаратные средства интерфейса — это БИС с управляемыми функциями, такие как, например, многорежимный буферный регистр (МБР), входящий в состав серии К589, или устройство обмена информацией (ОИ) из серии К587.

Более подробно принципы организации МП систем изложены в § 21.

3. Магистральность

Интерфейс МП системы имеет *магистральную* организацию. Магистральность — почти необходимый принцип построения структуры МП системы, поскольку только так можно организовать обмен информацией в условиях ограничений, накладываемых интегральной технологией.

В чем смысл магистральной организации?

Обмен информацией в МП и МП системе, структурные схемы которых изображены на рис. 2 и 7, организован таким образом, что имеются всего три многоразрядные шины, которые осуществляют все необходимые связи внутри МП, а также ввод/вывод данных, адресов и управляющих сигналов за его пределы и за пределы МП системы.

Эти шины заменяют все многообразие необходимых связей, поскольку в каждый момент времени связывают только те элементы структуры, которым в этот момент необходим обмен информацией.

Пространственное распределение межсоединений в этом случае заменяется временным распределением связей различных источников и приемников ин-

формации по одним и тем же (в данном случае по трем) линиям связи. Аналогично организована, например, телефонная связь, когда большое количество абонентов может связываться по одной и той же линии, но не одновременно.

Сигналы, запрашивающие разрешение на обмен между теми или иными элементами структуры МП или МП системы, вырабатываются по окончании заполнения информацией соответствующих выходных и очищении входных регистров и длятся все время, пока шина занята другими связями, начавшимися раньше или имеющими приоритет перед данной. Это обстоятельство отрицательно сказывается на системном быстродействии, но с ним приходится мириться, так как магистральная организация — мощное средство рационального использования полезной площади кристалла за счет использования поверхности, которую при использовании пространственного разделения связей занимали бы соединительные проводники и контактные площадки под гораздо большее количество внешних выводов.

Подключение требуемых элементов структуры к магистральной шине осуществляется с помощью так называемых схем с тремя состояниями. Два состояния — это обычные логические 0 и 1, а третье — состояние высокого выходного сопротивления — означает, по существу, обрыв, в результате которого схема отключается от шины. Сигнал управления третьим состоянием, по сути, и является сигналом разрешения приема и передачи информации по магистральной шине.

4. Прерывания

Микропроцессорные системы могут обмениваться информацией с большим количеством и разнообразным набором периферийных устройств. К ним относятся дисплеи на электронно-лучевых трубках для графического отображения данных, печатающие устройства, панели ключевого управления, цифровые индикаторы, накопители на магнитных лентах, дисках, барабанах, релейные переключатели, шаговые двигатели, цифро-аналоговые (для вывода) и аналого-цифровые (для ввода) преобразователи и пр.

Для связи с этими устройствами работу МП системы необходимо прервать на время, необходимое для обмена, и организовать ее по программе, обеспечивающей такой обмен, после чего вновь приступить к выполнению рабочей программы с того места, где она была прервана. Кроме обеспечения связи с периферийными устройствами прерывания служат для останова МП в конце программы или по сигналу оператора, а также при выполнении ошибочной команды, при переполнении внутренних регистров или ОЗУ.

Прерывается программа работы по сигналу запроса на прерывание, который вырабатывается либо внешним устройством непосредственно, если оно подготовилось ко вводу информации в МП систему, либо в ответ на сигнал опроса, посылаемый из МП системы, если в ходе выполнения программы необходим ввод или вывод информации. Подпрограмма обслуживания или организации прерываний (так называют программу ввода/вывода) хранится в ПЗУ и может быть не одна. Количество таких подпрограмм определяет разнообразие устройств и способов обмена информацией с ними. В этом случае говорят о векторном прерывании, т. е. о прерывании, выбранном из некоторого множества возможных с указанием обслуживаемого устройства.

В ходе выполнения подпрограммы обслуживания прерывания может возникнуть необходимость прервать и ее для обмена информацией с другим периферийным устройством, имеющим старший приоритет, после чего вернуться к предыдущему прерыванию, а затем к рабочей программе. Количество приоритетов или уровней, а также наличие векторных прерываний характеризуют «коммуникабельность» МП. Обслуживание прерываний может осуществляться с помощью стека (см. § 1).

Некоторые, особенно первые модели МП не имели готовых подпрограмм обслуживания прерываний, «зашитых» в ПЗУ, что заставляло программиста каждый раз, когда в этом появлялась необходимость, организовывать в рабочей программе останов и обмен информацией с устройствами ввода/вывода. Многоуровневые векторные прерывания позволяют упростить программирование и существенно улучшить использование микропроцессором рабочего вре-

мени, исключая субъективизм в оценке необходимости прерывания на данном шаге рабочей программы. Однако в ряде случаев использования МП в системе необходимости в прерываниях может и не быть.

На рис. 8 показаны временная диаграмма выполнения трех прерываний с различными приоритетами и изменение содержания стековых регистров при их обслуживании.

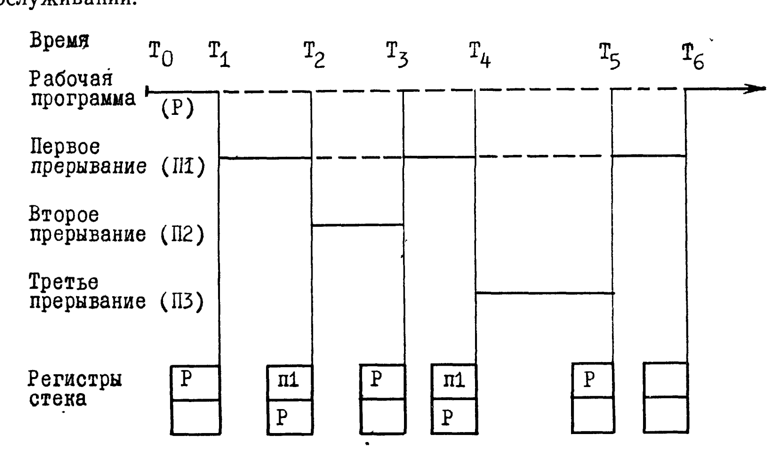


Рис. 8. Временная диаграмма приоритетных прерываний с использованием двухрегистрового стека.
Р — командное слово рабочей программы; $п_1$ — командное слово программы первого прерывания.

В интервале T_0—T_1 выполняется основная программа, и к моменту T_1, соответствующему сигналу прерывания с некоторым приоритетом, верхний регистр стека оказывается заполненным командным словом, к которому программа должна была бы перейти, если бы не произошло прерывание в этот момент. Первое прерывание обслуживается до прихода сигнала на второе прерывание, имеющее старший приоритет, при этом к моменту T_2 верхний регистр стека заполняется командным словом из программы обслуживания первого, к которому надо будет перейти, чтобы продолжить эту программу. По окончании программы второго прерывания в момент T_3 это командное слово выбирается из стека (пришло последним, а вышло первым — в чем и «хитрость» стека!) и продолжает программу первого прерывания до прихода в момент T_4 следующего прерывания, также имеющего старший приоритет. По окончании обслуживания этого прерывания в момент T_5 опять продолжается исполнение первого, после чего в момент T_6 происходит переход к выполнению основной программы, начиная с командного слова, записанного в стек первым. Стек при этом полностью очищается.

Таким образом, наиболее длительное первое прерывание, имеющее младший приоритет, выполнялось «по кускам» в интервалах T_1—T_2, T_3—T_4, T_5—T_6.

5. Прямой доступ к памяти

В ходе выполнения МП системой рабочей программы нередко возникает необходимость обмена информацией между периферийными устройствами и ОЗУ. Такой обмен может осуществляться при посредничестве МП, который, прервав выполнение рабочей программы, в течение одного цикла принимает информацию от периферийного устройства (от ОЗУ), а в течение следующего цикла передает информацию в ОЗУ (в периферийное устройство).

Внутренние регистры команд, адресов и данных МП в этом случае выполняют роль промежуточного звена, на обмен с которым затрачивается время, равное, по крайней мере, двум циклам на каждое передаваемое слово. При

передаче больших объемов информации это время существенно задерживает выполнение основной программы. Возможность исключить участие МП из процесса обмена между периферийными устройствами и ОЗУ позволяет сократить время обмена.

Такая возможность обеспечивается специальным устройством — контроллером прямого доступа к памяти (ПДП), который может быть реализован как в том же кристалле, что и МП, так и вне МП с помощью добавочных ИС, ряда специальных команд и небольшого количества дополнительных ячеек ОЗУ. На рис. 9, *а*, *б* упрощенно пояснен принцип ПДП.

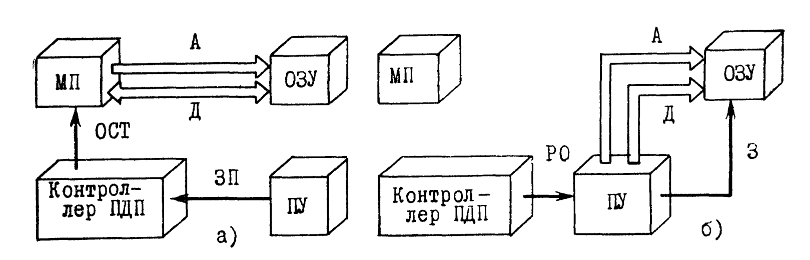


Рис. 9. Контроллер ПДП по сигналу запроса прерывания из периферийного устройства ПУ останавливает работу МП (*а*), после чего ПУ по сигналу разрешения обмена РО непосредственно связывается с ОЗУ (*б*) и по сигналу *З*, разрешающему запись, заносит данные Д в ОЗУ по адресу А.

Периферийное устройство (ПУ), готовое к выводу информации (таким может быть, например, внешнее магнитное ЗУ), посылает сигнал запроса прерывания (ЗП) в контроллер ПДП, который по этому сигналу выбирает подпрограмму обслуживания прерываний и, остановив работу МП (сигнал ОСТ), подключает информационную Д и адресную А магистрали ко входу ОЗУ и выходу ПУ, разрешая ПУ обмен с ОЗУ (сигнал РО). За каждый цикл ОЗУ адресуется информационное слово с разрядностью, равной разрядности магистрали данных МП. Режим записи, соответствующий переносу данных из ПУ в ОЗУ, определяется сигналом записи *З*.

Контроллер ПДП может, как правило, обслуживать обмен информацией с ОЗУ нескольких ПУ, сигналам ЗП которых присвоен различный по старшинству приоритет. Основными функциями контроллера ПДП, таким образом, следует считать:

определение приоритета сигнала ЗП;

прерывание рабочей программы, выполняемой МП;

прерывание подпрограммы обслуживания обмена информацией ПУ с младшим приоритетом;

выработка сигнала РО и адресация ПУ;

определение режима записи/считывания;

восстановление хода выполнения рабочей программы по окончании обмена.

Преимущества ПДП особенно существенны при выполнении программ, связанных с обработкой больших объемов информации по относительно коротким алгоритмам, когда время, затрачиваемое на обмен между ПУ и ОЗУ, велико по сравнению со временем обработки данных микропроцессором. В то же время в ряде случаев необходимости в ПДП практически нет, однако стремление разработчиков удовлетворить требованию универсальности использования привело к реализации ПДП у большинства МП второго и третьего поколений.

6. Микропрограммное управление

В § 1 при описании структуры МП было отмечено, что устройство управления (УУ) преобразует код операции, входящий в командное слово, в комбинацию сигналов, воздействующих на все элементы структуры МП и необ-

ходимых для исполнения данной команды. УУ, таким образом, осуществляет связь между памятью команд и процессорной частью МП системы путем соответствующей дешифрации кода операции. Правила такой дешифрации закладываются разработчиком МП и определяют внутреннюю структуру и способ построения УУ.

Существуют два подхода к организации управления МП. Первый, называемый аппаратным управлением, предполагает установление в процессе проектирования однозначного соответствия между данным кодом и совокупностью воздействующих сигналов путем создания импровизированных постоянных соединений между определенными логическими элементами МП. Такой подход характерен бессистемностью или неупорядоченностью этих соединений и означает по существу отсутствие какого-либо структурного принципа в их проектировании, что является традиционным в разработке вычислительных средств домикропроцессорных поколений.

Другой подход, определяемый как микропрограммирование или *микропрограммное управление* (МПУ), предполагает упорядочение методики проектирования и обеспечивает определенную систему в построении структуры УУ. Термин «микропрограммное управление» введен в 1951 г. М. Уилксом, впервые предложившим эту идею, и определен им как «систематический и упорядоченный подход к проектированию устройства управления любой вычислительной системы». Это определение не раскрывает в полной мере всех сторон такого способа управления и указывает, скорее, на стремление к выработке теоретически обоснованного принципа как исторически сложившуюся предпосылку возникновения МПУ.

На практике МПУ стало методом реализации УУ, при котором аппаратное управление заменено управлением на основе ПЗУ, запрограммированного определенным образом. Информация в ПЗУ «зашита» таким образом, что в каждом цикле работы МП, соответствующем одному обращению к ПЗУ, вырабатывается комбинация логических сигналов, управляющая одним функциональным узлом МП. Отсюда сразу следует, что МПУ предполагает последовательное, распределенное во времени управление, что резко увеличивает время выполнения команды по сравнению с аппаратным управлением. Это, пожалуй, наиболее существенный недостаток МПУ, не позволявший ему долгое время получить широкое распространение из-за отсутствия быстродействующей элементной базы, применение которой могло бы скомпенсировать снижение системного быстродействия.

С точки зрения пользователя МП системы, наличие в ней МПУ означает, что каждая команда, воспринимаемая программистом как выражение некоторого единого и законченного действия, в системе разбивается на последовательность микрокоманд, выполняемых по очереди и составленных заранее. Количество и функциональный состав микрокоманд МП определены его внутренней структурой и не могут быть изменены, однако в этом и нет необходимости. Гораздо важнее, что на основе жесткого состава микрокоманд можно создавать различные системы команд, наиболее приспособленные для эффективного решения тех или иных задач в смысле как скорости их решения, так и удобства программирования, вплоть до непосредственной реализации каждой командой операторов языка высокого уровня. С использованием репрограммируемых ПЗУ такое свойство становится важнейшим преимуществом МПУ, характерным для реализации именно в МП системах. Возможности пользователя в этом случае расширяются за счет создания и введения в МП систему оптимальных систем команд путем стирания из РеПЗУ предыдущей информации и записи новой. Гибкость, приобретаемая МП системой с МПУ на основе РеПЗУ, принципиально позволяет реализовать в ней любые свойства, такие как программная совместимость с другой МП системой, использование произвольного языка программирования, специализация по быстродействию, т. е. возможность наиболее быстро решать определенный круг задач, и пр.

Рассмотрим вкратце принцип организации МПУ в МП системе. На рис. 10 изображена общая схема МПУ, которая на первый взгляд кажется тривиальной. Действительно, адрес первой микрокоманды из последовательности, реализующей одну команду, записывается в счетчик микрокоманд (СМК — аналогичный счетчику команд в структуре МП). По этому адресу из памяти микропрограмм (МПЗУ) выбирается микрокомандное слово, разрядность m кото-

рого, очевидно, определяет количество двоичных сигналов, комбинация которых через дешифратор микропрограмм (ДМП) непосредственно управляет состоянием всех элементов структуры МП. В ДМП по признаку, содержащемуся в микрокомандном слове, определяется необходимость перехода к следующей микрокоманде данной команды или к первой микрокоманде следующей команды, если исполнена последняя микрокоманда. Адрес следующей микрокоманды

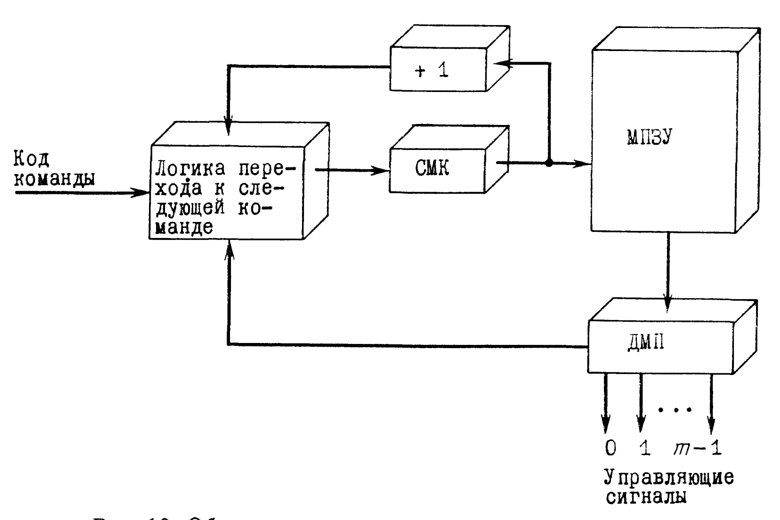


Рис. 10. Общая схема микропрограммного управления.
СМК — счетчик микрокоманд; *МПЗУ* — память микропрограмм; *ДМП* — дешифратор микропрограмм.

образуется в счетчике путем прибавления единицы к адресу предыдущей или, в случае перехода к новой команде по сигналу из ДМП, обращения к памяти команд с последующим повторением всей последовательности описанных выше действий.

Управление при такой организации осуществляется за две фазы — фазу обращения к МПЗУ и фазу выборки микропрограммы из регистра дешифратора. При использовании МПЗУ, время обращения к которому равно времени исполнения одной микропрограммы, фазу исполнения можно совместить с фазой выборки следующей. В этом случае управляющие слова выбираются из дешифратора в каждой фазе, что увеличивает скорость МПУ.

В наиболее простом случае МПЗУ представляет собой логическую матрицу, образованную системой горизонтальных и вертикальных шин, соединенных между собой в местах некоторых пересечений (рис. 11). Каждая горизонтальная шина соответствует одной микрокоманде, а количество вертикальных шин определяет разрядность управляющего слова. Количество горизонтальных шин (т. е. микрокоманд) ограничено разрядностью адреса микрокоманды n и не может быть больше $2^n—1$. По каждому адресу в состояние логической единицы приводится единственная, соответствующая этому адресу горизонтальная шина, которая в свою очередь возбуждает все вертикальные шины, имеющие с ней контакт. Другие горизонтальные и вертикальные шины находятся в состоянии логического нуля. Комбинация из единиц и нулей на вертикальных шинах образует управляющее слово.

Такая матрица реализует на вертикальных шинах логическую функцию ИЛИ, поскольку для приведения вертикальной шины в состояние единицы необходим контакт только с одной единственной горизонтальной шиной. Контакты с другими горизонтальными шинами, находящимися в данный момент в состоянии логического нуля, значения не имеют.

Для управляющего слова характерна довольно большая разрядность (32 бит и более), а количество микрокоманд может достигать нескольких сотен. Это

приводит к требованию большого объема МПЗУ и заставляет разработчиков искать пути экономичного использования памяти микропрограмм.

Наиболее интересным и эффективным способом экономии объема памяти при выработке микропрограмм считается применение программируемой логической матрицы (ПЛМ). Не вдаваясь в подробности ее достаточно сложного

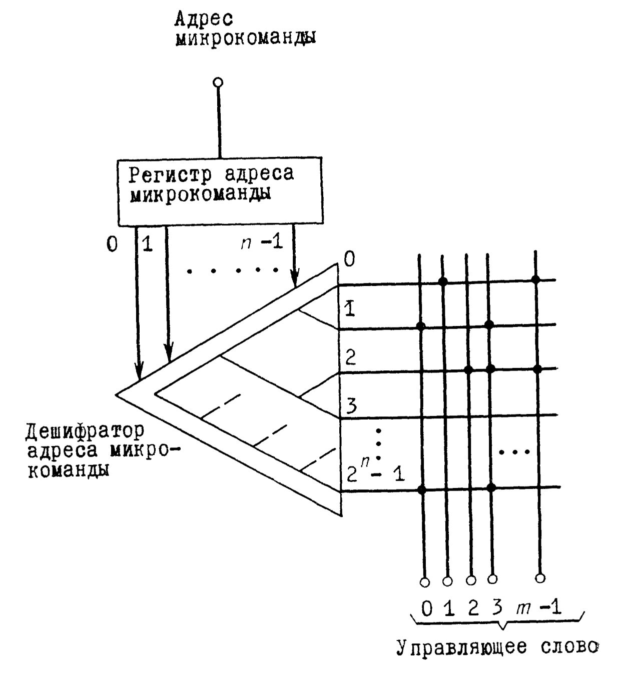


Рис. 11. Матрица памяти микропрограмм.
n — разрядность адреса микрокоманды; m — разрядность управляющего слова.

устройства, отметим, что ПЛМ содержит две матрицы, первая из которых реализует на выходных шинах функцию ИЛИ и аналогична описанной выше, а вторая реализует функцию И. Выход первой матрицы подключен ко входу второй. Такая конструкция обладает более широкими возможностями, чем приведенная на рис. 11, и особенно при реализации управления в сложных системах. Высокая степень упорядоченности структуры ПЛМ позволяет применять машинные методы при ее проектировании. Кроме того, на основе ПЛМ возможно создание различных структур, аналогичных по функциям элементам «жесткой» логики, таких как, например, преобразователи кодов, дешифраторы и другие, широко используемые в МП технике.

7. Программные средства

Для ЭВМ термин «программные средства» объединяет собой всю совокупность информации, необходимой для эффективного функционирования машины, а также постановки и решения на ней определенных задач.

В МП технике этот термин имеет несколько более широкий смысл, поскольку обозначает еще и средства проектирования программных и аппаратных средств МП системы на базе МП комплектов.

Информация, составляющая программные средства, может храниться в ЗУ или быть представлена в виде записи с помощью определенных формализаций, которыми являются *языки программирования* и речь о которых пойдет ниже.

Программные средства МП системы (рис. 12) обеспечивают:

организацию совместного функционирования всех элементов структуры МП системы (операционная система);

создание пользователем рабочих программ (система программирования, редактирования и отладки);

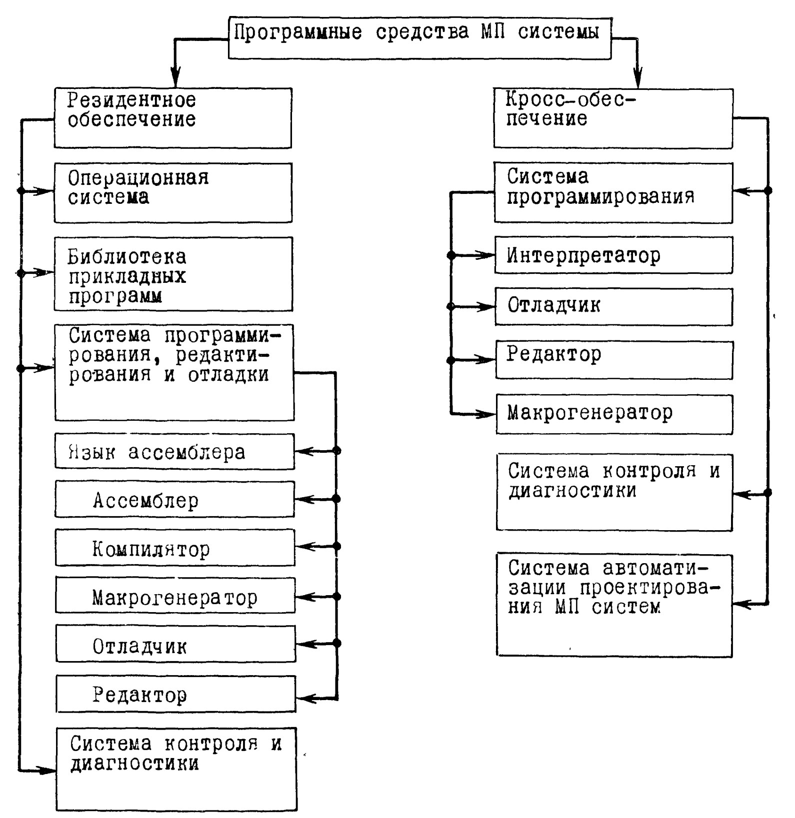


Рис. 12. Упрощенная структура программных средств МП системы.

использование самих программ, накапливаемых в процессе их создания (библиотека прикладных программ);

контроль правильности функционирования МП системы и диагностику отказов в ее работе (система контроля и диагностики);

проектирование программных и аппаратных средств МП системы на базе МП комплектов при помощи внешней универсальной или специализированной вычислительной системы (система автоматизации проектирования).

Следует различать программные средства собственно МП и МП системы. Для МП это набор команд МП, подпрограммы стандартных преобразований и т. п. Сюда же можно отнести одну или несколько рабочих программ, если МП функционирует как контроллер и нет необходимости в смене данной группы программ. Доступ программиста к этим программным средствам ограничен и обусловлен только возможностью применения ППЗУ и РеПЗУ.

Из приведенного перечисления функций программного обеспечения видно, что в него входят программы как поставляемые изготовителем и разработчиком МП системы, так и программы, составленные ее пользователем.

К первым относятся группа программ, обеспечивающих функционирование МП системы, совокупность которых называется операционной системой,

система программирования, редактирования и отладки, помогающая программисту составлять рабочие программы, система контроля и диагностики работы МП системы и система автоматизации проектирования, дающая возможность выбирать для данного класса решаемых задач оптимальный состав и структуру аппаратных и программных средств МП системы.

Вторую группу образует библиотека программ, накапливаемых в результате эксплуатации данной МП системы, а также других вычислительных систем.

Возможность использования программ, составленных для других вычислительных средств, реализуется при помощи специальных программ-трансляторов, преобразующих коды языка программирования этих средств в коды данной МП системы.

Языки программирования выступают в качестве посредников между языком человека (с помощью слов и математических символов которого можно описать состав и последовательность действий для выполнения любой совокупности вычислений) и комбинацией двоичных кодов, непосредственно воспринимаемых вычислительной системой.

Подразделяются языки программирования на уровни по степени близости к человеческому языку, т. е. по возможности использования их при минимальной специальной подготовке.

Не учитывая здесь языка микропрограмм (микропрограммирование рассмотрено в предыдущем параграфе отдельно), языком самого низкого уровня следует считать двоичные коды, комбинации которых образуют команды, воспринимаемые МП системой. К языкам низкого уровня можно отнести также *язык ассемблера,* отражающий особенности системы команд данной МП системы и образованный набором соответствующих мнемонических кодов.

С мнемоникой мы часто сталкиваемся, например, в условных обозначениях на лицевых панелях измерительных приборов, мнемоническими можно назвать большинство дорожных знаков. Цель мнемоники — облегчить запоминание большого количества обозначений (к примеру, таких, как коды языка ассемблера) путем придания им формы, ассоциирующейся с содержанием выполняемых по ним действий.

Языки низкого уровня не являются универсальными, поскольку могут применяться для составления программ только той МП системы, для которой они разработаны. Это создает серьезные трудности, так как специалисту, работающему с различными МП системами, каждый раз приходится преодолевать «языковый барьер», а программные средства в двоичных кодах или языке ассемблера не годятся для различных систем.

Относительно универсальными являются языки высокого уровня. Программы, составленные на них, не зависят от состава команд МП системы, в которой будут использованы. Они тоже состоят из набора мнемонических кодов, так называемых операторов, каждый из которых может быть реализован группой команд на языке ассемблера.

Наиболее распространенными языками высокого уровня, используемыми для программирования МП систем являются Фортран-IV, Бейсик и специально созданный PL/M (Programming Language for Microprocessors — язык программирования для микропроцессоров).

В качестве примера программирования на различных языках в табл. 3 показана программа, составленная в двоичных кодах и на языке ассемблера в сравнении с той же программой на языке PL/M. Согласно программе МП определяет меньшее из двух чисел, хранящихся в ячейках памяти X и Y, вычитает его из большего, к результату прибавляет 5 и посылают сумму в ячейку Z.

Командные слова в первой колонке представлены восьмибитным двоичным кодом, причем, как видим, одному коду на языке ассемблера (вторая колонка) могут соответствовать несколько командных слов. Содержание выполняемых операций поясняется в третьей колонке.

В этом примере принимается, что X, Y и Z хранятся в памяти по последовательным адресам, т. е. адрес Y получен путем прибавления единицы к адресу X, а адрес Z — прибавления единицы к адресу Y. В примере с PL/M считается, что адреса ячеек X, Y и Z определены в программе ранее.

Таблица 3

Пример программы на различных языках

Двоичные коды	Мнемоническая запись инструкций на языке ассемблера	Пояснение
00 100 001 00 000 010 00 000 111	ABS LXIH 27	Обращение к ОЗУ по адресу $10_2=2_{10}$ и $111_2=7_{10}$, содержащемуся в счетчике команд, для считывания содержимого ячейки X
01 111 110	MOVA, M	Запись содержимого ячейки X в аккумулятор
00 100 011	INXH	Прибавление единицы к адресу ячейки X для получения адреса ячейки Y
10 010 110	SUBM	Вычитание содержимого ячейки Y из содержимого аккумулятора (т. е. получение в аккумуляторе разности $X—Y$)
11 110 010 00 001 011 00 000 011	JP LOC	Если $X—Y\geqslant 0$, происходит переход по адресу $1011_2=11_{10}$ и $0011_2=3_{10}$ к команде LOC
00 101 111	CMA	Если $X—Y<0$, изменяется знак содержимого аккумулятора, что в двоичной арифметике достигается заменой всех 0 и 1 и ...
00 111 100	INRA	... прибавлением к содержимому аккумулятора 1
11 000 110 00 000 101	LOC ADIS	Прибавление $5_{10}=101_2$ к содержимому аккумулятора
00 100 011	INXH	Прибавление 1 к адресу ячейки Y, хранимому в счетчике команд, для получения адреса Z
01 110 111	MOVM, A	Запись содержимого аккумулятора в ячейку Z
11 001 001	RET	Программа закончена. Возвращение к рабочей программе

Язык высокого уровня PL/M

```
ABS: procedure;
Z=X—Y; IF Z<0 THEN Z=—Z; Z=Z+5
RETURN
END ABS;
```

Программирование на языке высокого уровня значительно сокращает время составления и отладки программ (в 2—5 раз для программы из двухсот команд по сравнению с двоичным кодированием) и во многих случаях является единственным приемлемым методом программирования. Однако за преиму-

щества такого программирования приходится расплачиваться увеличением времени решения задач МП системой (в 1,5—3 раза по сравнению с двоичным кодированием) и бо́льшим объемом требуемой для этого памяти.

Программные средства, составленные на языке низкого уровня, неразрывно связанном с данной МП системой и предназначенном для использования только с ней, образуют так называемое *резидентное обеспечение*. Помимо резидентного обеспечения существует большая группа программ на языке ассемблера внешней ЭВМ или на языке высокого уровня, называемая *кросс-обеспечением*. Кросс-обеспечение предназначено для использования на другой ЭВМ и несет те же функции, что и резидентное, за исключением функций операционной системы, программы которой «защиты» в ПЗУ и внешнее ЗУ МП системы. Кроме того, в состав кросс-обеспечения входят программные средства системы автоматизации проектирования, позволяющие на базе внешней, высокопроизводительной ЭВМ, используя ее программное обеспечение, разрабатывать МП системы со свойствами, наиболее приближенными к классу решаемых задач.

Наличие системы проектирования — важнейшая особенность, характерная для МП техники и обеспечивающая реализацию потенциальной гибкости МП системы, т. е. приспосабливаемости (адаптируемости) к различным задачам за счет перестройки структуры и выбора оптимального состава программных средств на базе одного и того же МП комплекта. Однако примеры эффективного перехода потенциальной гибкости МП системы в фактическую пока единичны.

Связь кросс-обеспечения с резидентным, т. е. перевод программ с языков высокого уровня в двоичные коды команд МП системы, а также связь языка ассемблера МП системы с ее двоичными кодами, как уже отмечалось, обеспечивают программы — трансляторы, входящие в состав резидентного обеспечения.

Один из двух видов резидентных трансляторов — так называемый *компилятор* переводит программу, составленную на языке высокого уровня, в программу двоичных кодов МП системы, которая в свою очередь может быть введена в МП систему для получения результата вычислений и использоваться многократно без повторной компиляции. Переход с языка ассемблера в двоичные коды осуществляет программа ассемблер — другой вид резидентного транслятора.

В кросс-обеспечении трансляция с языка высокого уровня происходит при помощи интерпретатора, причем, если ассемблер и компилятор переводят программу в программу, то интерпретатор позволяет сразу после своей обработки в процессоре внешней ЭВМ получить результат. Другими словами, интерпретатор, анализируя операторы языка высокого уровня, непосредственно выполняет указанные в них действия с помощью заранее составленных подпрограмм, входящих в состав интерпретатора, поэтому не требуется вторичной обработки программы, как это необходимо для компилятора и ассемблера.

Для уяснения функций, возложенных на отмеченные выше и другие составляющие программного обеспечения МП системы, рассмотрим процесс программирования и его основные этапы, которые необходимо выполнить программисту на пути от математической записи задачи до ввода ее в МП систему для решения (рис. 13).

Первый из этих этапов — составление *алгоритма*, которым можно считать запись с помощью математических символов и необходимых пояснений всей последовательности условий и действий, соответствующих выполнению задачи Затем определяются значения или диапазоны значений входных и состав выходных данных и оценивается время, необходимое МП системе на решение.

Следующий этап — составление так называемой структурной схемы. Она представляет собой графическое изображение логических связей между некоторыми условиями и выполняемыми по ним действиями, наглядность которых облегчает дальнейшую работу программиста. Прямоугольником обычно обозначают действия, а ромбом — условия. На рис. 14 представлена структурная схема программы, приведенной в примере на с. 26 (табл. 3).

Затем определяется язык программирования, при этом учитывается сложность задачи, требуемая скорость решения и возможности ЗУ. На выбранном

языке составляется исходная программа, которая заносится, например, перфорированием на карты и вводится во внешнее ЗУ.

Запись на языке ассемблера значительно облегчается в результате использовании так называемых макрокодов. Каждый макрокод объединяет группу

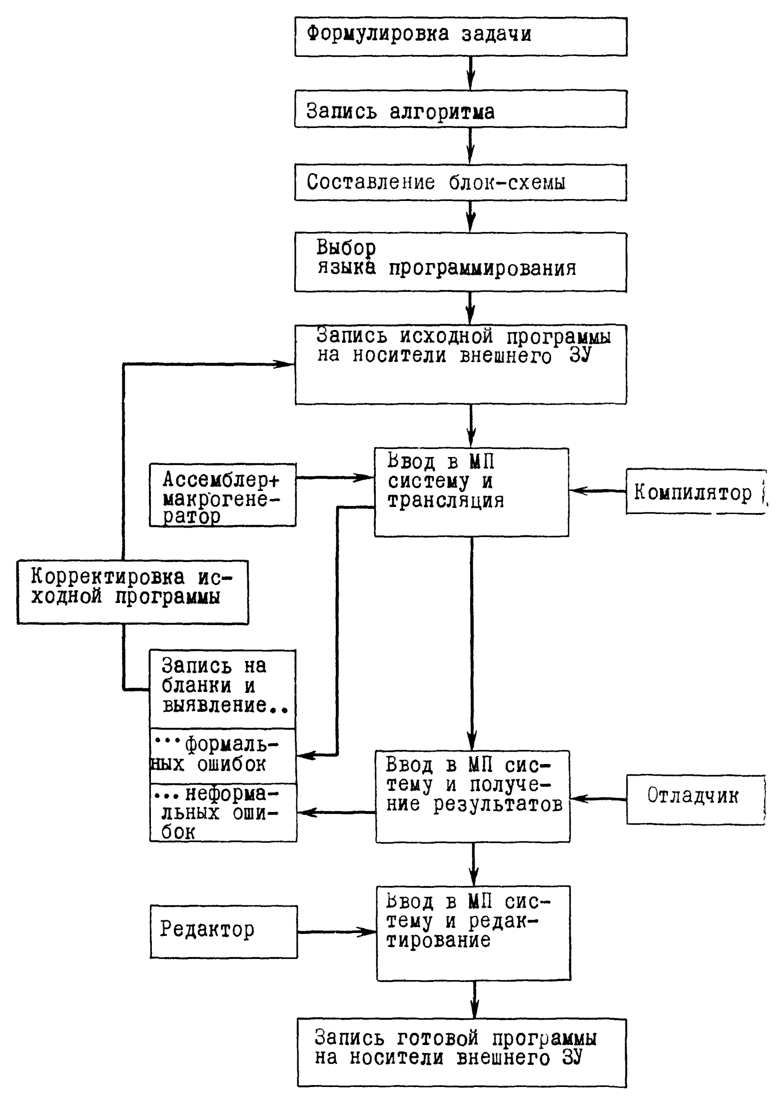


Рис. 13. Основные этапы программирования с помощью собственных аппаратных и программных средств МП системы.

последовательных кодов на языке ассемблера, встречающуюся в программе часто, что позволяет каждый раз заменять группу кодов одним макрокодом. Это дает возможность уменьшить вероятность формальных (т. е. связанных с формой записи) ошибок и ускоряет процесс программирования. Обрабатывает макрокоды специальная программа — макрогенератор.

На этапе обработки исходной программы МП системой после занесения ее на носитель происходит трансляция с языка программирования в двоичные коды системы команд. Для этого в МП систему в качестве рабочей вводится программа ассемблер или компилятор, а коды исходной программы воспринимаются системой как входная информация. Результат трансляции выводится на печать с указанием формальных ошибок, допущенных при составлении исходной программы. Ошибки корректируются путем изменения перфорации соответствующих карт и повторной трансляции.

Кроме того, на этом этапе, если используется язык ассемблера, происходит обработка макрокодов. Макрогенератор вводится в МП систему наряду с ассемблером в качестве рабочей программы. После этого при помощи специальной программы, называемой *отладчиком*, МП система позволяет программисту находить и анализировать ошибки неформального характера, т. е. такие, которые приводят не к тем результатам, которые ожидаются от выполнения поставленной задачи, что может быть следствием, например, неверно выбранного алгоритма или неправильно составленной блок-схемы. Отладчик обеспечивает вывод на печать исполняемых команд и содержания необходимых участков ОЗУ в определенные моменты исполнения программы.

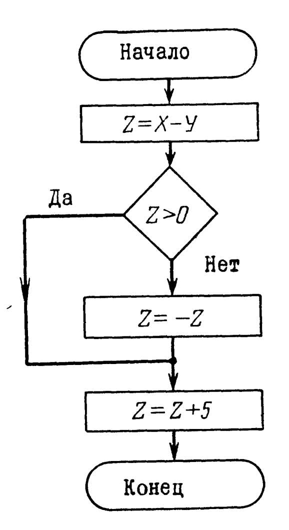


Рис. 14. Структурная схема программы, приводимой в табл. 3.

Требуемые коррективы также заносятся на перфокарты с исходной программой, которая вслед за этим еще раз проходит трансляцию и отладку. Такой цикл повторяется до тех пор, пока не получится полностью отлаженная программа, которая может быть лишь частью общей исходной программы, поскольку последнюю, как правило, для упрощения составления и отладки приходится разбивать на несколько относительно самостоятельных частей, транслируемых и отлаживаемых по очереди.

Отдельно составленные и отлаженные части объединяются в единое целое при помощи редактора — программы, налаживающей связи между ними в соответствии с общей структурной схемой. Редактор обеспечивает логические сопряжения, их последовательность и распределение по памяти.

Полученная таким образом программа, записанная на носителях внешнего ЗУ, готова для работы и может быть сохранена в библиотеке прикладных программ для дальнейшего использования.

Глава вторая

ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОПРОЦЕССОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ МНОГООБРАЗИЕ СФЕР И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

8. Технологические и схемотехнические способы изготовления больших интегральных схем

Технология изготовления БИС воплотила в себя все лучшее, что накоплено полупроводниковой технологией за почти тридцатилетнюю историю ее развития.

В настоящее время основным материалом интегральных микросхем является монокристаллический полупроводниковый кремний, качеством которого, т. е. минимальным наличием примесей и бездефектностью структуры, в значительной степени определяется возможность увеличивать интеграцию изготавливаемых ИС.

Технологический процесс изготовления БИС включает в себя сложный комплекс операций, состав и режимы проведения которых в основном различны для двух видов технологии. Первая — биполярная технология — основана на применении биполярных транзисторов, вторая — МОП (металл — окисел — полупроводник)-технология — на использовании транзисторов с полевым эффектом.

Большие интегральные схемы, изготавливаемые по биполярной технологии, различаются в свою очередь по схемотехническим способам реализации, которых в основном три. Это транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки (ТТЛШ), интегральная инжекционная логика (ИИЛ или И^{2}Л) и эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ). В МОП-технологии можно выделить четыре схемотехнических способа реализации БИС: МОП с проводимостью канала *p*-или *n*-типа (*p*-МОП или *n*-МОП), а также комплементарная или дополняющая МОП (КМОП) и ее модификация, использующая полупроводниковый кремний на сапфировой подложке (КМОП/КНС).

По схемотехнике *p*-МОП впервые удалось на кремниевом кристалле площадью 10 мм^2 разместить 2—3 тыс. логических элементов, необходимых для организации законченной, программно-управляемой структуры — простейшего процессора типа 4004, впервые изготовленного фирмой «Интел» (США) в 1971 году. Затем необходимого уровня интеграции достигла схемотехника *n*-МОП, несколько превосходящая *p*-МОП по быстродействию при той же потребляемой мощности.

Базовый логический элемент, использующий одновременно *p*- и *n*-канальные МОП транзисторы, послужил основой создания МП БИС по схемотехнике КМОП, характеристики которой в совокупности уже существенно выше, чем у предыдущих типов схемотехники. Использование сапфировой подложки в схемотехнике типа КМОП/КНС позволило примерно вдвое сократить задержки переключения логических элементов, т. е. повысить быстродействие.

Значительным продвижением в погоне за быстродействием оказалось достижение интеграции, необходимой для создания БИС, биполярной полупроводниковой технологией, причем если ТТЛШ и ЭСЛ известны сравнительно давно, то И^{2}Л изобретена в 1972 году одновременно в США и ФРГ и сразу же нашла применение в изготовлении БИС.

Базовые логические элементы КМОП, ТТЛШ, И^{2}Л и ЭСЛ показаны на рис. 15, *а—г*.

Характеристики схемотехнических способов изготовления МП БИС рассмотрены в их связи с характеристиками МП в § 9, здесь же проведем сравнение их возможностей по времени задержки переключения одного логического элемента и потребляемой им мощности.

Произведение задержки на мощность потребления называется работой переключения и характеризует степень совершенства схемотехники и процесс ее улучшения по мере приближения к теоретическому пределу, который для кремниевых ИС оценивается примерно в 10^{-15} Дж. На рис. 16 представлены зависимости быстродействия логических элементов, выполненных различными схемотехническими способами, от мощности потребления. Отметим, что для *p*-МОП, И^{2}Л, ТТЛШ и ЭСЛ работа переключения слабо зависит от быстродействия и мощности и в небольших пределах может считаться постоянной. Для *n*-МОП и КМОП, наоборот, работа переключения целиком зависит от мощности потребления, быстродействие же постоянно. Рисунок 16 также иллюстрирует пределы возможностей той или иной схемотехники. Из него видно, что ближе других к теоретическому пределу работы переключения находится КМОП схемотехника, однако она не позволяет достичь задержки переключения менее нескольких десятков наносекунд. Наиболее широкий диапазон изменения задержки и потребляемой мощности имеет И^{2}Л схемотехника, однако и ее быстродействие не выше, чем схемотехники КМОП. Логические элементы *p*-МОП и *n*-МОП обеспечивают те же задержки, что и И^{2}Л, но при бóльших мощностях потребления, т. е. имеют более высокое значение работы переключения.

Наиболее быстродействующими, как следует из рис. 16, являются элементы, выполненные по ТТЛШ и ЭСЛ схемотехнике, они же наиболее мощные. Как видим, каждая из видов схемотехники имеет преимущественную область своего использования по быстродействию, перекрываемую другими, за исключе-

нием *p*- и *n*-МОП, которые постепенно вытесняются И²Л, имеющей меньшую работу переключения.

Рассматривая всю совокупность значимых характеристик технологий МП БИС, включающую кроме быстродействия и мощности потребления уровень интеграции, помехозащищенность, количество уровней питающего напряжения, технологичность, стоимость и т. п., можно сказать, что каждая из них имеет

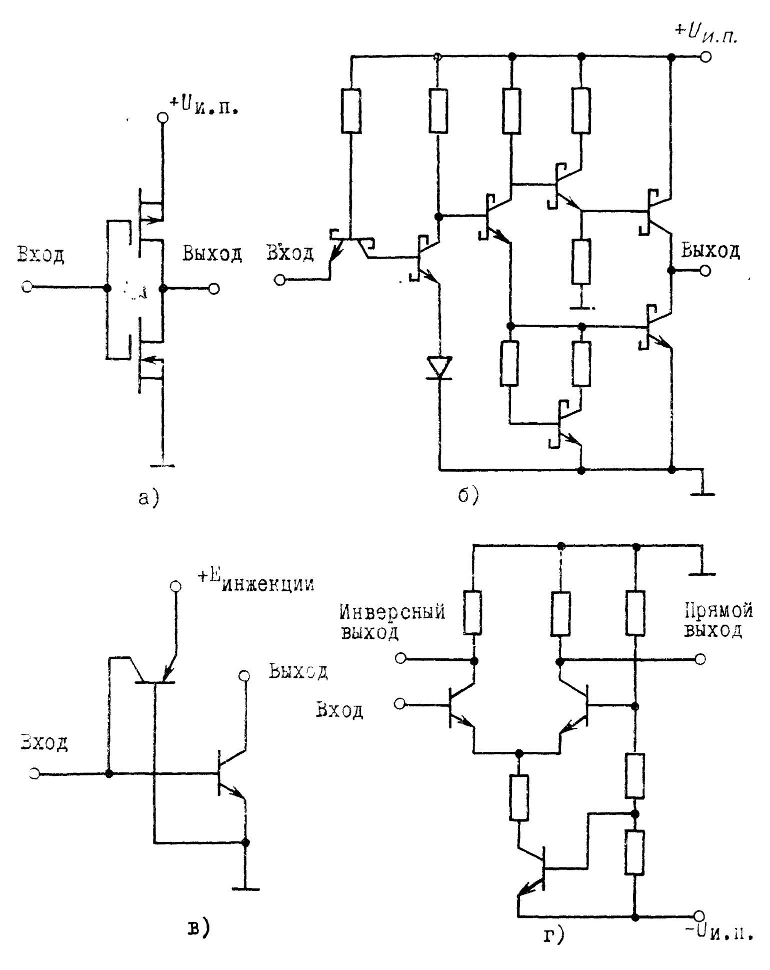


Рис. 15. Схемы базовых логических элементов КМОП (*а*), ТТЛШ (*б*), И²Л (*в*) и ЭСЛ (*г*).

право на существование и дальнейшее совершенствование присущих ей преимуществ.

Наряду с совершенствованием существующих идет интенсивный поиск новых технологических и схемотехнических способов реализации БИС, обеспечивающих бóльшую интеграцию и меньшую работу переключения логических элементов. Многообещающими в настоящее время считаются логические схемы, действие которых основано на использовании эффекта Ганна, а также эффекта Джозефсона. Уже находит применение новая модификация МОП технологии — так называемая V-МОП, позволяющая значительно увеличить интеграцию за

счет увеличения полезной площади кристалла путем использования в нем поверхности V-образных углублений. Перспективной считается возможность использования арсенида галлия в качестве полупроводникового материала для изготовления БИС.

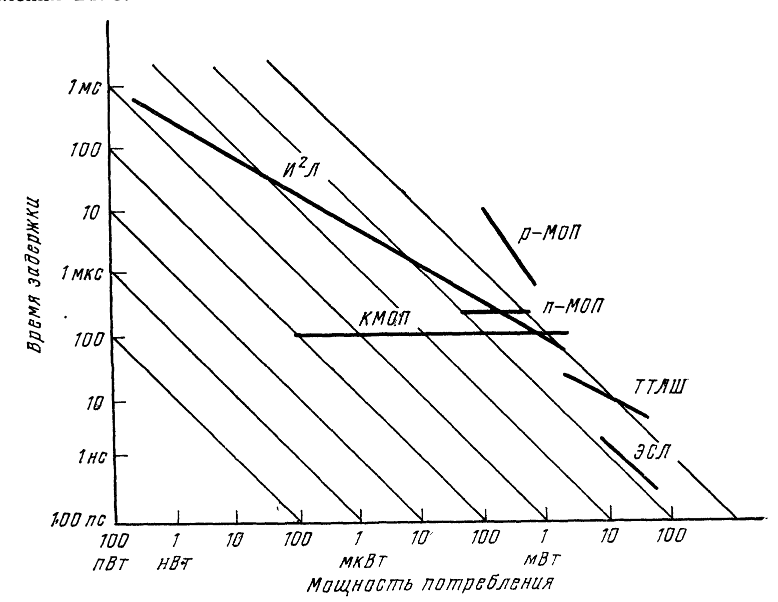


Рис. 16. Сравнение диапазонов изменения быстродействия и мощности потребления логических элементов, выполненных различными схемотехническими способами.

9. Характеристики микропроцессоров как больших интегральных схем

Наличие у МП элементных и аппаратурных свойств определяет состав характеризующих его параметров. Система параметров или характеристик МП, совокупность которых определяет наиболее эффективную область использования и особенности разработки систем на его основе, должна, очевидно, включать в себя характеристики, присущие как электронным цифровым вычислительным средствам, так и интегральным схемам. Ниже приведены основные характеристики МП и связи их с внутренней и внешней структурой (архитектурой) и интегральной технологией МП. Некоторые из этих характеристик уже рассмотрены в гл. 1 при описании общих принципов организации МП, остальные рассматриваются с точки зрения их оценки при выборе сферы наиболее эффективного применения МП.

Основными характеристиками МП, присущими электронным цифровым вычислительным средствам и определяемыми внутренней и внешней структурой, являются:

разрядность;
емкость адресуемой памяти;
число внутренних регистров;
магистральность, микропрограммное управление;
возможность и количество уровней прерывания;
наличие стековой организации и количество стековых регистров;
наличие и состав резидентного и кросс-программного обеспечения;
универсальность (специализация).

Основными характеристиками МП, присущими интегральным схемам и определяемыми интегральной технологией, являются:

быстродействие;

мощность потребления;
габариты и масса;
совместимость с ТТЛ, количество уровней питания;
надежность;
эксплуатационная стойкость;
стоимость.

10. Быстродействие

В наиболее общем смысле быстродействие МП, так же как и любых цифровых вычислительных средств, определяется как средняя скорость выполнения некоторого алгоритма, состав команд которого представляет собой смесь, отражающую специфику класса решаемых задач. Смеси для различных классов задач составляются на основе статистического обобщения команд всех характерных для данного класса алгоритмов. Существуют, например, смесь Гибсона, с помощью которой можно сравнивать быстродействие различных вычислительных средств при решении ими научно-технических задач, и другие смеси. Однако необходимо учитывать, что полученное таким образом значение носит усредненный характер и может отличаться от значения, полученного для конкретной задачи.

Из-за трудности количественного определения быстродействия в приведенном выше смысле на практике пользуются менее общим, но более доступным упрощенным понятием. Также употребимы понятия времени цикла и тактовой частоты, косвенно связанные с быстродействием.

Чаще всего быстродействие МП характеризуется временем или скоростью выполнения короткой операции сложения содержимого регистра R с содержимым аккумулятора с последующей пересылкой результата в регистр R (операция типа RR), хотя в литературе встречаются и другие определения. Однако сравнение МП по быстродействию в приведенном смысле не может считаться корректным в произвольном случае и, больше того, нередко приводит к заблуждениям. Дело в том, что алгоритмы выполняемых задач, отражая специфику самих задач, могут содержать различное количество операций типа RR, время выполнения которых в данном случае принято за быстродействие. К тому же, сам МП может быть ориентирован, как уже отмечалось, на выполнение различных алгоритмов, в которых удельный вес операции сложения может быть практически любым.

Таким образом, по скорости выполнения операции RR можно судить только о быстродействии универсальных МП, а сравнивать по этой характеристике можно лишь функционально одинаковые МП при решении ими одной и той же задачи.

Временем цикла или обращения принято называть период времени, затрачиваемый МП на обращение к одному слову в памяти. Это время может определяться быстродействием как самого МП, так и запоминающего устройства.

Тактовая частота — это частота тактового генератора, внешнего или входящего в состав МПК, которую позволяют задать временные задержки синхронизируемых генератором сигналов МП. За один такт в различных МП выполняется различное число микроопераций, время выполнения каждой из которых может быть разным, поэтому пользоваться тактовой частотой, как и временем цикла, можно лишь для качественной оценки быстродействия, принимая во внимание указанные выше обстоятельства.

Отчасти о быстродействии можно судить по схемотехнике и технологии изготовления МП, поскольку они определяют временные задержки логических элементов, образующих структуру МП. Как уже было показано, быстродействие возрастает в ряду логических схем, реализованных на основе использования схемотехники: *p*-МОП, *n*-МОП, КМОП, КМОП/КНС, И^{2}Л, ТТЛШ и ЭСЛ, т. е. каждая следующая схемотехника обеспечивает большее быстродействие, чем предыдущая. Ориентировочные значения характеристик быстродействия МП приведены в табл. 4.

Как видим, объективная и универсальная оценка быстродействия МП является весьма сложным делом и на сегодняшний день для нее практически не существует удобных и достаточно универсальных критериев.

Ориентировочные значения характеристик быстродействия, мощности

Характеристики МП	Схемотехника	
	p-МОП	*n*-МОП
Время выполнения операции типа RR, мкс	4—10	4—6
Скорость выполнения операций типа RR, млн. операций/с	0,1—0,25	0,25—0,18
Время цикла, мкс	0,7—5	0,5—4
Тактовая частота, МГц	0,2—1,5	1—2
Мощность потребления, Вт/кристалл	0,6—1,0	0,75
Достигнутая степень интеграции, вентилей/мм^2	90	110

11. Мощность потребления, габариты и масса

Важной для вопросов, связанных с применением, является такая характеристика МП, как мощность потребления. Значительную часть объема и массы большого класса устройств, выполненных на интегральных микросхемах, занимает источник питания. Переход от ИС малой и средней степени интеграции на БИС МП позволит, сохранив быстродействие, более чем вдвое сократить мощность потребления, габариты и массу, что значительно расширит возможности применения вычислительных средств. В простых МП системах низкого быстродействия, где мощность потребления невелика, а габариты и масса источника питания менее существенны по сравнению с габаритами и массой МП БИС, выигрыш по этим характеристикам при переходе от ИС малой и средней степени интеграции составляет от 5 до 20 раз. Как отмечалось в § 8, произведение мощности логического элемента на его быстродействие — величина примерно постоянная для ИС, р-МОП, И^{2}Л, ТТЛШ и ЭСЛ-типа и снижение мощности возможно только за счет уменьшения быстродействия. Мощность, рассеиваемая элементами кристалла БИС, накладывает ограничение на степень интеграции и требует дополнительных мер по отводу тепла от кристалла. Поэтому, если для микромощной схемотехники МОП и И^{2}Л степень интеграции ограничена размером элементарной ячейки и полезной площадью кристалла, то для ИС ТТЛШ и ЭСЛ-типа существенным оказывается ограничение, накладываемое мощностью рассеяния и возможностью отвода тепла от кристалла. Этот факт иллюстрирует две нижние строки табл. 4, в которых указаны ориентировочных значений мощности потребления и степени интеграции МП для различных технологий.

12. Совместимость с транзисторно-транзисторной логикой, количество уровней питания

Необходимо отметить такие свойства МП, определяемые технологией, как требуемое число уровней напряжения питания и совместимость логических уровней с наиболее распространенными уровнями ТТЛ. Одноуровневое питание позволяет обойтись более простым стабилизированным источником, а совместимость с уровнями ТТЛ исключает необходимость в преобразователях уровня при работе МП с периферийными устройствами или друг с другом.

В табл. 5 приведены значения уровней напряжения питания и данные по совместимости логических уровней МП для различных типов логики.

13. Разрядность

Разрядность МП или, что то же самое, длина его информационного слова показывает, какое количество двоичных знаков (бит) информации может быть одновременно обработано процессором.

Таблица 4

потребления и степени интеграции различных МП БИС

МП БИС				
КМОП	КМОП/КНС	И²Л	ТТЛШ	ЭСЛ
2,5—6	2—2,6	1—1,5	1—0,5	0,1 и менее
0,18—0,4	0,38—0,5	0,7—0,1	1—2	10 и более
0,12—1	0,01—0,1	0,2—1	0,1—0,2	0,01—0,1
1—3	10—100	1—5	5—10	10—100
0,01—0,2	0,1—0,3	0,8	2—3	До 5
45	100	150	25	25

От разрядности, очевидно, зависит точность вычислений. Так, 4 разряда обеспечивают максимальную погрешность 12,5%, 8 разрядов — 0,8%, 12 разрядов — 0,05% и 16 разрядов — 0,003%.

Помимо точности разрядность в ряде случаев определяет быстродействие, так как при разрядности процессора меньшей, чем длина хранимого в ЗУ информационного слова, обработка информации производится последовательными порциями с затратами времени на два или более обращений к памяти.

Таблица 5

Значения уровней напряжения питания и данные по совместимости логических уровней для различных МП

Характеристики МП	Схемотехника МП						
	p-МОП	*n*-МОП	КМОП	КМОП/КНС	И²Л	ТТЛШ	ЭСЛ
Уровни напряжения питания, В	+5 —12	+5 —5 —12 или только +5	3—15	3—15	1—5	+5	—2 —4÷5,2
Совместимость с ТТЛ	Нет	Есть	Есть	Есть	Нет	Есть	Нет

Бóльшая разрядность МП требует большего количества выводов и повышенной интеграции БИС. В то же время полезная площадь кристалла, используемая для размещения элементов, значительно уменьшается с ростом количества контактных площадок под выводы, поэтому создание МП высокой разрядности ограничено возможностями интегральной технологии.

Выход найден в создании так называемых процессорных секций с наращиваемой разрядностью, выводы которых позволяют объединить их для параллельной обработки информации и получать таким образом длину слова, кратную разрядности одной процессорной секции. Этим достигается оптимизация разрядности, т. е. исключение избыточности, возможной при использовании МП с фиксированной длиной слова, а также обеспечивается возможность получения большой разрядности (24, 32 бит и более).

Кроме того, большее число внешних выводов совокупности процессорных секций позволяет организовать для них большее количество связей с устройствами памяти и внешними устройствами, исключить снижающее быстродействие мультиплексирование, увеличить количество уровней прерываний по внутренним и внешним сигналам, т. е. организовать более совершенный и быстродействующий интерфейс, что особенно важно для работы МП в составе системы.

14. Емкость адресуемой памяти

Емкость адресуемой памяти характеризует возможность использования МП в системе с точки зрения наибольшего объема обрабатываемой информации и определяется разрядностью адресной шины, позволяющей осуществлять пересылку адреса информации или нужной команды. При использовании, например, 16-битовой адресной шины возможна адресация до 65 535 ячеек памяти ($2^{16}-1$) или почти 64 Кбит информации (1 Кбит $=2^{10}=1024$ бит).

15. Надежность и эксплуатационная стойкость

Надежность, т. е. способность длительное время работать в определенных условиях без отказов, у МП почти такая же, как и у ИС малой и средней степени интеграции, и существенно выше, чем у аппаратуры, сходной с МП функциональной сложности, объединяющей при этом в своем составе сотни ИС.

Вообще говоря, надежность полупроводниковых (монолитных) интегральных схем не зависит непосредственно от количества составляющих их элементов, да и сами элементы можно выделить лишь условно. Принципиальная схема ИС отражает особенности топологии единого кристалла, а не свидетельствует о наличии в нем отдельных транзисторов, отдельных резисторов и отдельных связей между ними. Поэтому вероятность отказа определяется, главным образом, полезной площадью кристалла, т. е. пропорциональна вероятности проявления дефекта кристаллической структуры. Высокая же степень интеграции, обеспечивающая создание БИС МП, достигнута, главным образом, за счет уменьшения размеров элементарных ячеек интегральной структуры и улучшения качества кремния, позволившего довести площадь кристалла с 5—10 до 25—50 мм² без значительного ухудшения надежности БИС.

Надежность аппаратуры на ИС в значительной степени определяется качеством и числом внутренних межсоеднинений. В системах на БИС МП число соединений сведено к минимуму, что в основном и обусловливает их более высокую надежность.

Как и надежность, стойкость МП БИС к воздействию эксплуатационных факторов не ниже, чем у ИС малой степени интеграции, а по многим видам воздействий выше, чем у аппаратуры на ИС.

Особенно существенным является отсутствие необходимости в техническом обслуживании МП систем для целого ряда применений (кроме высокой надежности это также следствие относительно низкой стоимости). Это позволяет широко применять МП во всем диапазоне допустимых эксплуатационных воздействий, т. е. в условиях, где его работа не может быть непосредственно заменена или контролируема человеком. Бесспорные преимущества перед любыми другими системами управления, диагностики и сбора данных имеют микропроцессорные системы для работы в химически активных средах, в условиях аномальной температуры, влажности, давления, при вибрации, ускорении, ионизирующем излучении, т. е. везде, где исключено присутствие человека или требуется принятие защитных мер.

16. Классификация микропроцессоров. Основные характеристики зарубежных микропроцессорных комплектов

Рассмотренные в гл. 1 и 2 характеристики позволяют классифицировать МП по наиболее существенным из них с целью выбора эффективной сферы применения. Один из возможных вариантов такой классификации приведен на рис. 17.

По назначению МП могут быть поделены на две группы:

универсальные, т. е. позволяющие вместе с другими БИС МПК создавать микро-ЭВМ для широкого диапазона применений. Наиболее ярким примером может служить отечественная серия К580, а также МПК MCS-80 фирмы «Интел», ставший во всем мире образцом подобных систем;

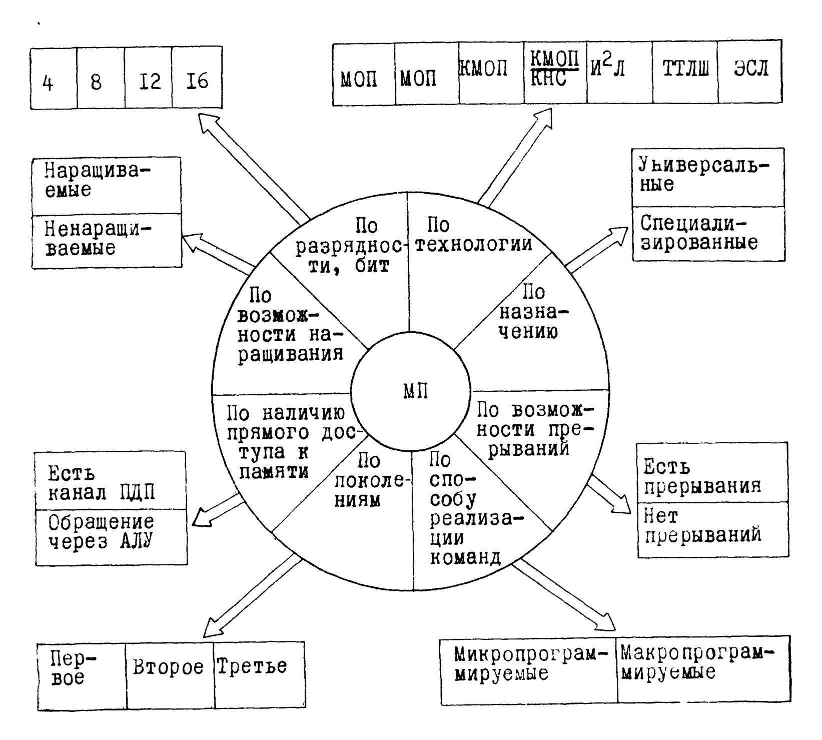


Рис. 17. Классификация микропроцессоров.

специализированные, существенное отличие которых от универсальных МП заключается в отсутствии необходимости в развитом программном обеспечении. Типичный пример специализированного МП — калькуляторные БИС.

Специализация МП в предполагаемом здесь смысле отнюдь не противоречит определению МП, как потенциально универсального элемента обработки информации. Набор команд специального МП включает все команды, необходимые для реализации любого заданного алгоритма, однако для некоторых специальных задач возможности по быстродействию у него выше.

По способу реализации команд или по способу управления МП делятся на микро- и макропрограммируемые.

Микропрограммное управление, как уже отмечалось в гл. 1, позволяет пользователю установить собственный набор инструкций (команд), оптимальных для реализации некоторых конкретных задач. Это делает МП наиболее «гибким», т. е. позволяет максимально приспособить его для решения широкого круга задач, и, кроме того, дает возможность интерпретировать архитектуру различных ЭВМ, используя их программное обеспечение.

Макропрограммное (жесткое аппаратное) управление принципиально не допускает такой возможности, но более экономично и, как правило, обеспечивает более высокое быстродействие.

Микропрограммирование, таким образом, особенно необходимо универсальным МП, предназначенным для широкого диапазона использований, однако следует еще раз отметить, что реализация потенциальных преимуществ микро-

программного принципа управления требует изменения системы микрокоманд, связанного с изготовлением новой БИС микропрограммной памяти, что требует значительных затрат времени и средств и не всегда устраивает пользователя. В последнее время наметилась тенденция более эффективного использования возможностей микропрограммирования путем применения внутри МП РеПЗУ, обеспечивающих возможность перезаписи информации электрическим способом или стирание ультрафиолетовыми лучами с последующей записью электрическими сигналами, как, например, это предусмотрено в МП модели 8748 фирмы «Интел».

На выбор способа управления МП основное влияние оказали возрастающие требования пользователей по обеспечению максимальной универсальности. Так, ранние модели МП, даже такие популярные, как 4004, 4040, 8008, 8080 фирмы «Интел», МС6800 фирмы «Моторола» (США), COSMAC фирмы «Эр Си Эй» (США), не имеют микропрограммирования, которое характерно для более поздних моделей микропроцессорных секций с наращиваемой разрядностью — 3002 фирмы «Интел», SBP0400 фирмы «Тексас Инструментс» (США) и отечественных серий К589, К587 и К584.

Возможность прерываний является неотъемлемым свойством универсальной ЭВМ и отсутствует в ряде моделей МП, главным образом, из-за стремления к упрощению внутренней структуры, которое диктовалось недостаточными возможностями интегральной технологии.

Наличие прямого доступа к памяти (ПДП) позволяет повысить быстродействие МП системы путем непосредственного быстрого обмена (минуя АЛУ) между ЗУ и внешними устройствами и обеспечивается составом БИС большинства существующих МП комплектов.

Исходя из требований к точности вычислений и учитывая вышеотмеченное влияние разрядности на быстродействие, выбирают оптимальную длину информационного слова МП для конкретной сферы применений либо предусматривают ее физическое варьирование, применяя микропроцессорные секции. Существует связь между разрядностью МП и реальными применениями [2, 6].

Подробнее связь характеристик МП, в том числе и быстродействия, с возможностью того или иного применения показана в § 23. Пример такой связи иллюстрирует табл. 6.

По аналогии с поколениями ЭВМ, три из которых заняли около тридцати лет, а четвертым считают поколение ЭВМ, элементной базой которых являются БИС, в том числе и МП БИС, во многих публикациях эволюцию МП техники за период с 1971 г. по настоящее время связывают с тремя поколениями МП [7—10]. Принадлежность к каждому из них определяется совокупностью признаков, включающих технологию изготовления, быстродействие, разрядность, особенности структуры и архитектуры, развитие средств программного обеспечения.

Первое поколение МП (1971—1973 гг.) характеризуется наиболее простой *р*-МОП технологией, 4—8-битовой разрядностью и малым быстродействием (время выполнения операции сложения типа RR около 10 мкс). Они имеют наиболее простую структурную организацию и слабую систему команд в количестве, равном 45—60. Адресуемая емкость памяти, как правило, невелика, и средства программного обеспечения ограничены. Типичные представители МП первого поколения — микропроцессоры типа 4004, 4040, 8008 фирмы «Интел» выпускаются до сих пор, так как благодаря своей низкой стоимости и техническим характеристикам отвечают потребностям многих сфер применения.

Ко второму поколению (1973—1975 гг.) относят МП, изготовленные по *n*-МОП технологии, что позволило значительно поднять быстродействие (время выполнения операции типа RR около 2 мкс). Эти МП имеют разрядность 8—16, более развитой состав команд, совершенную структуру и программное обеспечение. К недостатку МП второго поколения следует отнести необходимость для большинства типов МП трехуровневого напряжения питания, тогда как МП первого поколения достаточно двух уровней. Наиболее популярными моделями второго поколения стали МП 8080 фирмы «Интел», F-8 фирмы «Фейрчайлд Семикондактор» и МС6800 фирмы «Моторола» (США).

Микропроцессоры третьего поколения изготовлены по схемотехникам КМОП, КМОП/КНС, ТТЛШ, И^{2}Л и ЭСЛ. Они имеют фиксированную разрядность 8—16 бит или наращиваемую, кратную 2, 4 или 8 битам, среднее или высокое быстродействие и еще более совершенную структурную организацию и систему

Таблица 6

Пример связи разрядности МП с реальными применениями

Разрядность МП, бит	Предпочтительная сфера использования
4	Арифметические устройства измерительных приборов (мультиметры, осциллографы и др.) Простые контроллеры, технологические и бытовые автоматы, игры
8	«Интеллектуальные» терминалы Управление технологическими процессами Контроллеры Испытательное оборудование Управление транспортом Служебная, коммерческая, торговая и бытовая аппаратура
16	Системы связи Системы сбора данных Аналого-цифровые преобразователи Контрольно-распределительные системы (воды, газа, топлива, электроэнергии) Системы навигации Микро-ЭВМ широкого назначения
20—32	Системы связи Цифровые фильтры Преобразователи Фурье Автокорреляторы Микро- и мини-ЭВМ широкого назначения

команд. Характерными для них являются микропрограммное управление, наличие встроенного канала прямого доступа к памяти, развитое программное обеспечение. Технические характеристики вследствие различных технологий имеют значительный разброс и заключены в следующих пределах: время выполнения операции сложения типа RR 0,1—1 мкс, мощность рассеяния 10—2000 мВт. Уровень питающего напряжения один. Типичными представителями МП третьего поколения являются модели: 3002 фирмы «Интел», IM6100 фирмы «Интерсил» (США), ММ6701 фирмы «Монолитик Мемори» (США), SBP0400 фирмы «Тексас Унструмент», 8748/8048, 8085 и8086 фирмы «Интел».

В табл. 7 приведены основные характеристики некоторых наиболее массовых зарубежных МПК.

Глава третья

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ КОМПЛЕКТЫ

Рассмотрим здесь основные характеристики трех МПК, разработанных и освоенных в производстве отечественной промышленностью — серии К580, К587 и К589.

Состав комплектов и технические характеристики сведены в табл. 8.

Таблица 7

Основные характеристики микропроцессоров первого поколения (*p*-МОП)

Модель микропроцессора (фирма-изготовитель, страна)	Год выпуска	Число кристаллов МП	Технические характеристики					Особенности структуры						Программное обеспечение				
			Время выполнения операции сложения, мкс	Тактовая частота, МГц	Мощность потребления, Вт	Диапазон рабочих температур, °С	Уровни напряжения питания, В	Разрядность информационного слова, бит	Емкость адресуемой памяти, К	Стек (количество стековых регистров)	Возможность прерываний (число уровней)	Прямой доступ к памяти	Микропрограммное управление	Резидентное обеспечение	Кросс-обеспечение	Транслятор с языка высокого уровня	Система редактирования и отладки	Моделирующие программы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
AMI 7300 (American Microsystem, США) «Америкэн Микросистем»	1973	2	4	1	0,8	–20 +80	+5 –12	8	64	(32)	(4)	+	–	–	+	–	+	–
PPS-25 (Fairchild, США) «Фейрчайлд»	1973	4	62,5	0,4	0,6	0 +70	+5 –10	25×4	6	(4)	–	–	–	–	+	–	+	–
4004 (Intel, США) «Интел»	1971	1	10,8	0,75	1	0 +70	+5 –10	4	4	(3)	–	–	–	–	+	–	+	+
4040 (Intel, США) «Интел»	1974	1	10,8	0,75	1	0 +70	+5 –10	4	8	(7)	+	–	–	–	+	+	+	+
8008 (Intel, США) «Интел»	1972	1	20	0,5	1	0 +70	+5 –9	8	16	(7)	(8)	–	–	+	+	+	+	+
IMP-16 (National, США) «Нэшэнл»	1973	5	4,6	0,7	1,4	0 +70	+5 –12	16	64	(16)	(1)	+	+	+	+	+	+	+
PPS-4 (Rockwell, США) «Роквелл»	1973	1	5	0,2	0,23	–55 +125	–17	–17	4	(4)	(2)	–	–	–	+	–	+	–

Основные характеристики микропроцессоров второго поколения (n-МОП)

Модель микропроцессорного комплекта (фирма-изготовитель, страна)	Обозначение собственно МП (ЦПЭ) в комплекте	Год выпуска	Технические характеристики					Особенности структуры						Программное обеспечение				
			Время выполнения операции сложения, мкс	Тактовая частота, МГц	Мощность потребления, Вт	Диапазон рабочих температур, °С	Уровни напряжения питания, В	Разрядность информационного слова, бит	Емкость адресуемой памяти, К	Стек (количество стековых регистров)	Возможность прерываний (число уровней)	Прямой доступ к памяти	Микропрограммное управление	Резидентное обеспечение	Кросс-обеспечение	Транслятор с языка высокого уровня	Система редактирования и отладки	Моделирующие программы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
F-8 (Fairchild, США) «Фейрчайлд»	(F-3850)	1974	2	2	0,6	0 +70	+5, —12	8	64	(ОЗУ)	+	+	+	+	+	+	+	+
CP-1600 (General Instrument, США) «Дженерал Инструмент»	CP-1600	1974	3	5	0,75	0 +70	+12 +5, —5	16	64	(16)	(4)		+	+	+	+	+	+
MCS-80 (Intel, США) «Интел»	8080	1974	2	2	1	0 +70	+12 +5, —5	8	64	(ОЗУ)	+	+	—	+	+	+	+	+
MC 6800 (Motorola, США) «Моторола»	MC6800	1974	2	1	0,25	0 +70	+5	8	64	(ОЗУ)	+	+	+	—	+	—	+	—
TMS-9900 (Texas Instrument, США) «Тексас Инструмент»	9901	1975	1,3	3	1,2	—	+12 +5, —5	16	64	—	(15)	+	+	+	+	+	+	+
2650 (Signetic, США) «Сигнетик»	2650	1974	4,8	1,2	0,5	0 +70	+5	8	32	(8)	(1)	+	—	—	+	—	—	+

Основные характеристики МП третьего поколения

Продолжение табл. 7

Модель микропроцессорного комплекта (фирма-изготовитель, страна)	Обозначение собственно МП (ЦПЭ) в комплекте	Год выпуска	Схемотехника	Технические характеристики					Особенности структуры						Программное обеспечение				
				Время выполнения операции сложения, мкс	Тактовая частота, МГц	Мощность потребления, Вт	Диапазон рабочих температур, °С	Уровни напряжения питания, В	Разрядность информационного слова (наращиваемая), бит	Емкость адресуемой памяти, К	Стек (количество стековых регистров)	Возможность прерываний (число уровней)	Прямой доступ к памяти	Микропрограммное управление	Резидентное обеспечение	Кросс-обеспечение	Транслятор с языка высокого уровня	Система редактирования и отладки	Моделирующие программы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
AM2900 (American Micro Dewice, США) «Америкэн Микро Девайс»	(2901)	1975	ТТЛШ	0,1	10	0,93	—55 +125	+5	(4)	64	—	+	+	+	+	+	+	+	—
3000 (Intel, США) «Интел»	(3002)	1975	ТТЛШ	0,1	8	0,75		+5	(2)	0,5	—	(8)	+	+	+	+	+	+	+
MCS-48 (Intel, США) «Интел»	8048 или 8748	1976	*n*-МОП	2,5	2	0,4	0 +70	+5	8	64	+	+	+	—	+	+	+	+	+
MCS-80 (Intel, США) «Интел»	8086	1977	В-МОП	1	5		0 +70	+5	16	1000	+	+	+	—	+	+	+	+	+
M 6100 (Intersil, США) «Интерсил»	6100	1975	КМОП	2,5	8	0,01	—55 +125	4—11	(12)	4	+	+	+	—	+	+	+	+	+
MM6700 (Monolitic Memory, США) «Монолитик Мемори»	(6701)	1975	ТТЛШ	0,2	5	1,12	0 +70	+5	(4)	64		+	—	+	+	+	+	+	+
MC 10800 (Motorola, США) «Моторола»	(10800)	1975	ЭСЛ	0,05		1,3	0 +0,85	—2 —5,2	(4)	64	—	+	+	+	—	+	+	+	+
COSMAC (RCA, США) «Эр Си Эй»	—	1975	КМОП	6	2,67	0,01	—55 +125	4—11	(8)	64	—	+	+	—	+	+	+	—	—

Таблица 8

Характеристики МПК	Серия		
	К580	К587	К589
Состав комплекта	К580ИК80 — МП К580ИК55 — ППИ К580ИК51 — ПСИ К580ИК57 — КПДП К580ИК53 — ДВИ К580ИК59 — КПП	К587ИК2 — АУ К587РП1 — УП К587ИК1 — ОИ К587ИК3 — АР	К589ИК01 — БМУ К589ИК02 — ЦПЭ К589ИК03 — СУП К589ИК12 — МБР К589ИК14 — БПП К589АП16 — ШФ К589АП26 — ШФИ
Схемотехника	*n*-МОП	КМОП	ТТЛШ
Разрядность (наращиваемая), бит	8	(4)	(2)
Время выполнения операции сложения, мкс	2	2	0,1
Тактовая частота, МГц	2	0,5	8
Мощность потребления, мВт	1000 (МП)	10 (АУ)	750 (ЦПЭ)
Диапазон рабочих температур, °С	—10÷+70	—60÷+80	—10÷+70
Емкость адресуемой памяти, Кбит	64	64	0,5
Стек	ОЗУ	Нет	Нет
Возможность прерываний (число уровней)	(8)	Есть	(8)
Прямой доступ к памяти	Есть	Есть	Есть
Микропрограммное управление	Нет	Есть	Есть

17. Серия К580

В серию К580 входят 6 БИС, изготовленных по схемотехнике *n*-МОП, которые позволяют строить 8-разрядные универсальные и специализированные МП системы очень широкого диапазона применений. Универсальность комплекта в значительной степени обусловлена функциональной полнотой состава БИС, который включает:

универсальный 8-разрядный микропроцессор (МП) К580ИК80;

программно-управляемый интерфейс для периферийных устройств (ППИ) К580ИК55;

программно-управляемый интерфейс для каналов связи (ПСИ) К580ИК51;

контроллер прямого доступа к памяти (КПДП) К580ИК57;

программно-управляемый датчик временных интервалов (ДВИ) К580ИК53;

контроллер приоритетных прерываний (КПП) К580ИК59.

Кроме того, совместно с перечисленными БИС без каких-либо устройств сопряжения можно использовать четыре микросхемы из МПК серии К589 — К589ИР12, К589ИК14, К589АП16, К589АП26.

БИС К580ИК80 представляет собой 8-разрядное центральное процессорное устройство, предназначенное для использования в качестве элемента обработки

информации в МП системах обработки данных и управления. Система команд — фиксированная, общее число команд — 78, уровни входных и выходных сигналов совместимы с наиболее распространенными уровнями ТТЛ. Кристалл размером 4,2×4,8 мм содержит около 5 тыс. транзисторов и заключен в 48-выводной корпус.

Структура БИС К580ИК80 почти полностью совпадает со структурой, приводимой на обобщенной структурной схеме МП (см. рис. 2) и описанной в § 1. Единственное отличие заключается в том, что БИС не содержит стековых регистров, а позволяет организовывать стековую память в ОЗУ. Для этой цели среди регистров БИС имеется специальный 16-разрядный указатель стека, который дает возможность размещать память магазинного типа в любой зоне ОЗУ и обеспечивает обслуживание неограниченного числа подпрограмм.

Арифметико-логическое устройство представляет собой параллельное 8-разрядное устройство, выполняющее основные операции по обработке данных.

Устройство управления УУ вырабатывает управляющие сигналы, необходимые для выполнения команд в МП. В основу построения УУ положен принцип программируемой логической матрицы.

Регистры БИС включают:

два 8-разрядных регистра операндов О;

8-разрядный регистр команд К;

16-разрядный регистр адреса А;

флаговый регистр переполнения Ф;

четыре одноразрядных регистра состояний для индикации знака, переноса, четности и нуля С;

шесть 8-разрядных регистров общего назначения ОН;

16-разрядный указатель стека;

16-разрядный счетчик команд СК.

Интерфейс обеспечивается тремя раздельными магистральными шинами передачи данных И, адресов А и управляющих сигналов У. Шина И — 8-разрядная. Шина А — 16-разрядная и позволяет адресовать 64 Кбит памяти, а также 256 входов и 256 выходов внешних устройств. Шина управления обеспечивает синхронизацию работы МП, внешней памяти и устройств ввода/вывода, а также управление обслуживанием прерываний, прямого доступа к памяти и выдачу информации о состоянии МП.

Кроме перечисленных элементов структуры в БИС сосредоточено 30 ТТЛ буферов для работы с внешними схемами.

БИС К580ИК80 характеризуется высокой технологичностью изготовления, относительно низкой стоимостью и достаточно универсальной структурой, позволяющей широко применять ее для построения МП систем как вместе с другими БИС МПК серии К580, так и автономно.

БИС К580ИК55 предназначена для организации параллельного обмена информацией между МП системой и периферийными устройствами. Она включает в себя 8-разрядный буферный регистр для подключения к шине данных МП системы, три 8-разрядных регистра для связи с входами/выходами периферийных устройств и устройство управления, связанное с управляющей и адресными шинами МП системы. Управляющие сигналы задают режим работы (запись или считывание), а двухразрядный адрес определяет периферийное устройство, с которым происходит обмен.

Построение БИС основано на использовании схем с тремя устойчивыми состояниями (см. § 3). Использование БИС К580ИК55 исключает необходимость в дополнительных логических схемах, что позволяет считать ее законченным и достаточно универсальным элементом внешнего интерфейса, допускающим возможность автономного применения.

БИС К580ИК51 также может служить примером интерфейсного элемента, однако эта БИС в отличие от предыдущей принимает и передает информацию не параллельно (т. е. все разряды информационного слова одновременно), а последовательно, разряд за разрядом.

Такая необходимость существует при передаче данных на большие расстояния, когда нет возможности применять многопроводные линии связи, например при распределенном управлении на промышленном предприятии, при передаче цифровой информации по телефонной линии и т. д. БИС К580ИК51 преобразует параллельный двоичный код в последовательный при передаче и совершает

обратное преобразование при приеме. Разрядность слова данных составляет 8 бит.

БИС К580ИК53 служит для выработки временных задержек программируемой длительности. Содержит три независимых 16-разрядных счетчика, коэффициент пересчета которых определяется программой, а также схему управления режимом работы и буферные регистры для хранения 8-разрядных данных.

Задача выработки сигналов точной временной задержки на определенное число тактов работы часто встречается при выполнении МП системой рабочей программы. Реализовать такую задержку можно программным путем, организовав в рабочей программе выполнение так называемой «временной петли», т. е. циклически повторяемого «холостого хода». Применение БИС К580ИК53 позволяет избавить программиста от необходимости загромождать программу такими циклами путем обращения к одному из трех программно-управляемых счетчиков по специальной команде.

Если задержка, обеспечиваемая шестнадцатью разрядами одного счетчика, недостаточна, можно увеличить ее путем подключения разрядов двух других счетчиков.

Кроме того, БИС К580ИК53 может быть использована в качестве:

счетчика тактовых импульсов;

двоичного умножителя;

генератора импульсов реального времени (часов, минут, секунд и т. д.);

электронного регулятора скорости вращения двигателя.

БИС 580ИК57 предназначена для организации в МП системе обмена информацией между ЗУ и периферийными устройствами, минуя МП. Такой порядок обмена описан в § 5, здесь же необходимо добавить, что БИС организует обмен по четырем каналам, имеющим различный приоритет, причем данные вводятся и выводятся параллельно.

БИС К580ИК59 является 8-уровневым контроллером приоритетных прерываний. Функции такого контроллера описаны в § 4, а особенности данной БИС заключаются в возможности увеличения количества уровней приоритетных прерываний до 64 путем объединения с однотипными БИС.

18. Серия К587

Микропроцессорный комплект серии К587 содержит четыре БИС, изготовленных по технологии КМОП, и предназначен для построения на их основе различных вычислительных средств с быстродействием порядка 100—200 тыс. операций в секунду и сверхмалой потребляемой мощностью.

Программные средства, разработанные специально для этого МПК, включают как резидентное, так и кросс-обеспечение, позволяющее проектировать микро-ЭВМ с широкими функциональными возможностями — универсальные и ориентированные на определенный круг специальных задач. Кроме того, имеется возможность автономного использования БИС комплекта по их функциональному назначению в качестве самостоятельных или встроенных в аппаратуру модулей обработки цифровой информации. Существенными особенностями этого МПК являются микропрограммный принцип управления и возможность наращивания разрядности путем объединения нескольких 4-разрядных процессорных секций.

Аппаратные средства комплекта включают БИС:

арифметического устройства (АУ) К587ИК2;

управляющей памяти (УП) К587РП1;

обмена информацией (ОИ) К587ИК1;

арифметического расширителя (АР) К587ИК3.

Собственно говоря, микропроцессором ни одну из перечисленных выше БИС, взятую отдельно, назвать нельзя. МП здесь может быть образован в результате объединения с помощью интерфейсной БИС ОИ двух составных частей — БИС АУ и УП, содержащих в совокупности все элементы структуры МП.

Характерными особенностями БИС АУ, УП и ОИ являются микропрограммный принцип управления, а также возможность работы (включая и БИС

АР) в асинхронном режиме, что позволяет, например, реализовать пошаговое исполнение микрокоманд или остановку в любом месте программы.

БИС АУ типа К587ИК2 представляет собой 4-разрядный универсальный модуль обработки цифровой информации, объединяющий в своей структуре в основном элементы с функциями АЛУ и внутренних регистров СОЗУ. Разрядность МП с БИС АУ может быть увеличена до 32, т. е. возможно объединение в одном МП восьми БИС АУ. Кристалл помещен в 42-выводной корпус и содержит 2,5 тыс. транзисторов. Разнообразные сочетания из 168 типов микрокоманд, выполняемых АУ, обеспечивают возможность создания различных и в то же время совместимых на микропрограммном уровне систем команд.

Основное назначение БИС АУ — построение операционных блоков цифровых вычислительных средств различной разрядности, кратной 4.

БИС УП типа К587РП1 является автономным формирователем последовательностей 14-разрядных параллельных кодов и может использоваться в качестве генератора микрокоманд, а также как простейший контроллер. Кристалл БИС УП содержит около 6 тыс. транзисторов и размещен в 42-выводном корпусе. В МПК БИС УП служит устройством микропрограммного управления, в основу которого заложена программируемая логическая матрица ПЛМ. Информация в ПЛМ определяется заказчиком (пользователем МПК) и жестко записывается туда в ходе технологического процесса изготовления БИС. Информационная емкость ПЛМ — 64 логических произведения. Произвольное программирование ПЛМ в соответствии с требованиями пользователя определяет разнообразие возможностей использования БИС УП в автономном режиме в качестве преобразователя и генератора различных кодов (функций), простейшего элемента цифрового управления и т. п.

БИС ОИ типа К587ИК1 представляет собой автономный 8-разрядный модуль обработки и коммутации цифровой информации, служащий для организации внутри- и внепроцессорного параллельного обмена данными, организации интерфейса микропроцессоров, построения блоков прерывания, для использования в контроллерах периферийных устройств для управления ОЗУ. Основными операциями, выполняемыми БИС ОИ, являются:

коммутация информационных сигналов трех 8-разрядных каналов всеми возможными способами;

арифметико-логические операции;

операции преобразования форматов (из 16-разрядного кода в 8-разрядный и обратно, а также из последовательного кода в параллельный).

Общее количество микрокоманд, выполняемых БИС ОИ, — 60. Корпус 42-выводной, кристалл объединяет 3,5 тыс. транзисторов. Возможно наращивание разрядности до 32 путем объединения четырех БИС ОИ.

БИС АР типа К587ИК3 является специализированным цифровым автономным модулем обработки информации. Специализация БИС АР отражена в системе его 64 микрокоманд, ориентированной на быстрое выполнение операции умножения двух операндов, реализуемой аппаратными средствами, сдвига и поиска кодов битов над 8-разрядными операндами.

В основу БИС АР заложена матрица 8×8 одноразрядных сумматоров, с помощью которых происходят получение и сдвиг частичных сумм, получаемых при умножении каждого из разрядов одного сомножителя на разряды другого. Управляется БИС АР 7-разрядной микрокомандой. Предусмотрена возможность наращивания разрядности до 64 путем объединения восьми БИС АР.

К возможным областям применения вычислительных средств, построенных на основе МПК серии К587, относятся:

системы контроля и управления технологическими процессами;

системы программного управления станками;

тестовые и контрольно-измерительные системы;

встроенные средства первичной обработки информации в системах контроля и управления;

контроллеры управления периферийным оборудованием;

калькуляторы для простейших инженерных и экономических расчетов;

многопроцессорные вычислительные системы.

Примером микро-ЭВМ, реализованной на базе МПК серии К587, является микро-ЭВМ «Электроника НЦ-03», предназначенная для применения в системах управления технологическими процессами, измерительным и контрольно-

испытательным оборудованием, для сбора и предварительной обработки данных в информационно-поисковых комплексах, для решения вычислительных задач, а также для использования в вычислительных комплексах в качестве периферийных процессоров со специализированными функциями. Микро-ЭВМ «Электроника НЦ-03» имеет следующие основные характеристики:

разрядность информационного слова 16 бит;

скорость выполнения операций типа RR 100 тыс. операций/с;

объем памяти 32 К;

программное обеспечение — кросс-система программирования на ЭВМ БЭСМ 6;

потребляемая мощность 30 Вт;

габариты 480×360×220 мм;

масса 28 кг.

19. Серия К589

Микропроцессорный комплект серии К589 содержит семь БИС, изготовленных по технологии ТТЛШ, и предназначен для построения быстродействующих МП систем с различной организацией и быстродействием порядка 1 млн. операций/с. Так же как и предыдущий, этот комплект имеет микропрограммный принцип управления, модульную организацию и возможность наращивания разрядности МП, кратной 2.

В комплект входят следующие БИС:

блок микропрограммного управления (БМУ) К589ИК01;

центральный процессорный элемент (ЦПЭ) К589ИК02;

схема ускоренного переноса (СУП) К589ИК03;

многорежимный буферный регистр (МБР) К589ИР12;

блок приоритетного прерывания (БПП) К589ИК14;

шинный формирователь (ШФ) К589АП16;

шинный формирователь с инверсией (ШФИ) К589АП26.

Собственно микропроцессор в данном случае может быть образован совокупностью БИС ЦПЭ, БМУ и МБР.

БИС БМУ типа К589ИК01 представляет собой устройство управления выборкой последовательности 9-разрядных микрокоманд из памяти микропрограмм по 8-разрядному адресу, содержащемуся в командном слове. Отличие БИС БМУ от БИС УП серии К587 заключается в том, что первая БИС не содержит в себе информации микропрограмм, а лишь организует их считывание из ЗУ микропрограмм согласно заданным правилам соответствия каждой команде последовательности микрокоманд, тогда как БИС УП вырабатывает такие последовательности. Кроме того, БМУ совместно с блоком приоритетного прерывания БПП обеспечивает возможность организации прерываний. Общее количество микрокоманд, выбираемых БМУ, 512. Корпус БИС БМУ 40-выводной.

БИС ЦПЭ типа К589ИК02 включает в свою структуру АЛУ, регистры СОЗУ, дешифратор микрокоманд и предназначена для выполнения арифметических и логических операций над 2-разрядными операндами. Управляется ЦПЭ 7-разрядной микрокомандой, общее число микрокоманд 40. Кристалл БИС ЦПЭ размещен в корпусе с 28 выводами. Для построения МП с разрядностью N необходимо объединение $N/2$ БИС ЦПЭ.

Схема ускоренного переноса СУП типа К589ИК03 предназначена для обеспечения одновременного переноса информации групп регистров в старшие разряды. Такая необходимость возникает в МП, образованном путем объединения нескольких ЦПЭ при выполнении операции, разрядность результата которой больше разрядности каждого из операндов. Осуществление переноса последовательным сдвигом информации в каждом разряде существенно снизило бы скорость выполнения операций. Одна СУП позволяет организовывать перенос для восьми ЦПЭ, т. е. обслуживает 16-разрядный МП. Управляется СУП по сигналу разрешения переноса из БМУ. Корпус СУП 28-выводной.

БИС МБР типа К589ИР12 является универсальным 8-разрядным регистром с выходами, имеющими три состояния (логический 0, логическая 1 и состояние высокого выходного сопротивления, эквивалентное отключению выхода), и предназначена для организации магистрального обмена информацией между раз-

личными устройствами. Для управления состояниями выходов МБР имеет встроенную логику. В МБР формируется также сигнал запроса на прерывание. БИС МБР может быть использована в автономном режиме для реализации многих типов интерфейсных устройств, таких как мультиплексоры, двунаправленные шинные формирователи, каналы ввода/вывода и т. п. Кристалл размещен в 24-выводном корпусе.

БИС БПП типа К589ИК14 позволяет с помощью внешних сигналов — запросов на прерывание — останавливать выполнение текущей программы, запоминать состояние МП и переходить к обслуживанию прерывания. БПП опрашивается в конце выполнения каждой команды, и, если он принимает запрос на прерывание, БМУ переходит к обработке этой операции. Число уровней прерывания равно восьми, но может быть увеличено путем объединения нескольких БИС БПП. Так же как и МБР, кристалл БИС БПП имеет корпус с 24 выводами.

Шинный формирователь и шинный формирователь с инверсией типов К589АП16 и К589АП26 соответственно представляют собой четырехканальные коммутаторы и предназначены для увеличения нагрузочной способности МОП БИС при подключении их к системной магистрали. Выходы ШФ и ШФИ имеют три состояния. В ШФИ входные сигналы инвертируются. Корпуса обеих схем 16-выводные.

Программные средства МПК серии К589 включают систему микропрограммного проектирования, реализуемого с помощью так называемой базовой технологической машины — высокопроизводительной внешней ЭВМ. Высокое быстродействие, возможность создавать различные системы команд на основе набора микрокоманд МПК, а также варьировать структуру МП системы обеспечивают разнообразие применений серии К589. Основными сферами применения МПК этой серии считаются:

быстродействующие контроллеры с частотой выдачи управляющих сигналов до 10 МГц;

системы числового программного управления станками;

высокопроизводительные системы обработки данных;

многопроцессорные вычислительные системы.

Глава четвертая

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРОВ

20. Методы применения микропроцессоров. Классификация микропроцессорных систем

Сам по себе МП в том определении, которым мы здесь пользуемся, еще не способен перерабатывать информацию, как это делает, например, ЭВМ. Микропроцессор хоть и важный, но все же «кирпичик» — один из нескольких необходимых элементов, составляющих основу различных вычислительных устройств.

Основным методом применения МП является создание на основе его и других БИС МПК вычислительных МП систем, под которыми понимаются любые вычислительные, управляющие или другие системы, где обработка информации производится одним и более МП (рис. 18). Такое понятие МП системы включает в себя калькуляторы и простейшие контроллеры (малопрограммные управляющие системы, в которых рабочая программа зафиксирована в ПЗУ), микро-, мини-ЭВМ и многомикропроцессорные системы, функционально повторяющие возможности средних и больших ЭВМ.

Конструктивно-завершенная МП система, имеющая собственный источник питания, устройства связи с периферийными устройствами, панель управления и комплект программного обеспечения, может называться микро- или мини-ЭВМ в зависимости от разрядности, быстродействия, размеров и стоимости. Кроме того, отличительным свойством мини-ЭВМ принято считать наличие разнообразного периферийного оборудования — устройств отображения информации, внеш-

ней памяти, целевых устройств. Четкой границы, разделяющей ЭВМ на классы согласно совокупности значений этих характеристик, нет. Это связано с постоянной тенденцией к снижению размеров и стоимости при одновременном повышении разрядности и быстродействия ЭВМ на основе МП.

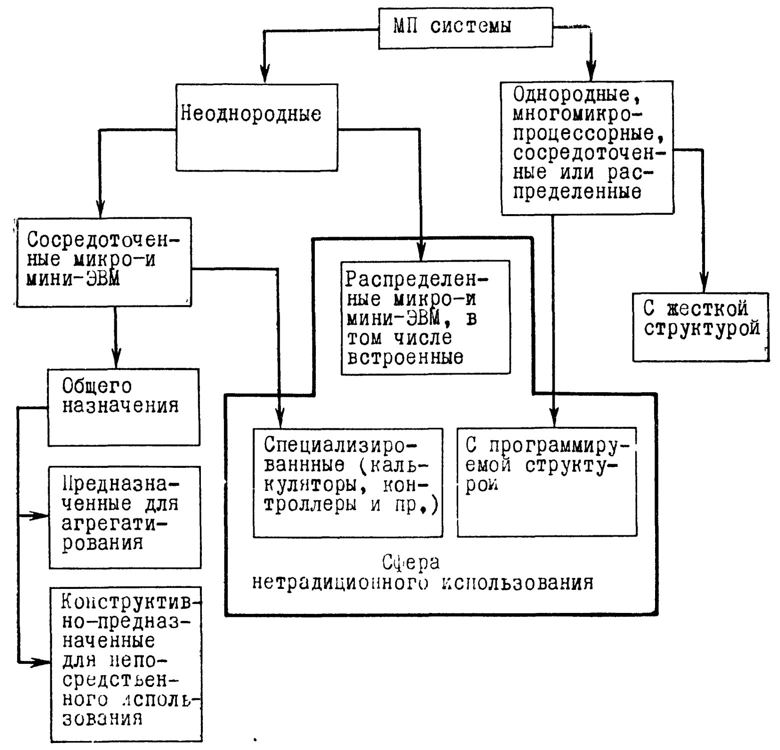


Рис. 18. Классификация МП систем.

Так, за период 1972—1976 гг. стоимость микро-ЭВМ уменьшилась на порядок, а быстродействие возросло в 3 раза. Уровень интеграции БИС МП, составляющих основу микро-ЭВМ, за этот же период увеличился в 20 раз (!), что позволило фирме «Интел», ведущей в мире по производству МП, создать сложные высокопроизводительные системы микро-ЭВМ и МП моделей 8748, 8048, 8085, 8086 в одном кристалле [11]. Такие факты убедительно показывают возможность создания функционально-законченной вычислительной системы в единственной микросхеме.

Ориентировочно можно сказать, что на сегодняшний день типичная микро-ЭВМ имеет разрядность до 16 бит, быстродействие — до 200 тыс. операций сложения в секунду. Для мини-ЭВМ эти характеристики имеют значения соответственно 32 бит, 500—800 тыс. операций сложения в секунду.

Кроме того, для микро-ЭВМ характерно наличие слаборазвитого интерфейса для обмена информацией с внешней средой, отсутствие или малое число периферийных устройств и селекторный (раздельный во времени) режим обмена с ними. Соответственно эти показатели у мини-ЭВМ лучше.

По отношению к степени специализации или, наоборот, универсальности микро-ЭВМ можно разделить на «сверхпростые» специализированные, предназначенные для решения узких задач (например, арифметических действий в калькуляторах, простейшего управления в контроллерах, замены аппаратной логики программным управлением функциями одного и того же МП), и общего назначения. Микро-ЭВМ общего назначения должны обладать достаточно универ-

сальной системой команд и, в отличие от «сверхпростых», в своем развитии стремиться к совершенствованию характеристик, приближаясь по их значениям к мини-ЭВМ.

Микро-ЭВМ общего назначения могут быть конструктивно подготовлены для работы оператора, т. е. иметь шасси, каркас, пульт управления и другие необходимые принадлежности, а могут предназначаться для агрегатирования, т. е. для работы в конструктивно- и функционально-едином комплексе аппаратуры и поэтому не иметь необходимых для автономной работы компонентов.

До сих пор речь шла о сосредоточенных вычислительных системах, т. е. о таких, в которых вычислительный процесс целиком протекает в рамках логической структуры ЭВМ с МП в качестве обрабатывающего и управляющего элемента. Такое построение является традиционным и практически повторяет функциональную организацию ЭВМ домикропроцессорного периода. Микропроцессор позволил, и это очень важно, реализовать принципиально новый подход к организации вычислений путем создания распределенных средств обработки информации. Распределение здесь означает прежде всего расчленение общего алгоритма решения задачи на ряд параллельно реализуемых алгоритмов, не связанных, насколько это возможно, друг с другом во времени, и, кроме того, наиболее оптимальное пространственное распределение вычислительного процесса путем встраивания специализированных МП систем непосредственно в датчики исходной информации.

Встроенные вычислительные системы оказались нетрадиционным, качественно новым методом применения МП, позволяющим по-новому решать задачи обеспечения быстродействия, надежности, живучести, сокращения размеров и массы средств автоматического управления, контроля и сбора данных. Характерные свойства МП дают возможность встроенного управления каждой отдельной единицей аппаратуры, оборудования, что обеспечивает создание полностью автоматизированных устройств и процессов.

Другой нетрадиционной особенностью МП является замена аппаратной логики, а вместе с ней и проектирования физической структуры вычислительной системы, программированием ее структурных свойств. Так, например, функции различных логических элементов — вентиля, триггера, счетчика, дешифратора и других — могут быть реализованы соответствующим программированием одного и того же МП при наличии необходимого количества ячеек памяти. Функциональный эквивалент одного логического элемента по оценочным данным требует 8—16 бит памяти [9]. В недалеком будущем стоимость БИС МП понизится настолько, что замена «жесткой» логики программируемыми структурно-одинаковыми элементами будет экономически оправдана. В отдельных случаях это имеет место уже сейчас.

Заслуживающим внимания методом применения МП, нацеленным в основном на повышение быстродействия, надежности и адаптируемости к различным классам задач, является создание однородных многомикропроцессорных систем. В отличие от рассмотренных выше неоднородных МП систем однородность здесь означает регулярный способ объединения большого количества однотипных МП. Это в ряде случаев позволяет практически неограниченно повышать быстродействие МП систем распараллеливанием вычислений. Пространственно такие системы, по-видимому, могут быть как сосредоточенными, так и распределенными, однако и те и другие должны строиться по принципам параллельной обработки информации и структурной однородности.

Наиболее перспективными следует считать многомикропроцессорные системы с программируемой структурой, объединяющие традиционные преимущества многопроцессорных систем с нетрадиционным методом применения МП в качестве логического элемента с программно-управляемыми функциями.

Подводя итог рассмотрению основных методов применения МП, еще раз отметим существование традиционного и нетрадиционного методов построения МП систем. Первый предполагает создание МП вычислительных средств с жесткой логической структурой, пространственно централизованной, в рамках которой протекает весь вычислительный процесс. Второй метод характеризуется распределением вычислений в пространстве, распараллеливанием во времени (неоднородные встроенные и однородные распределенные многопроцессорные системы), а также заменой аппаратной логики программированием функциональных свойств.

Оба метода открывают широкие возможности для применения МП в различных сферах, однако именно нетрадиционный метод позволяет рассчитывать на проникновение в недалеком будущем микропроцессоров во все сферы жизни, сделав МП систему таким же обычным и незаменимым явлением, как телефон или зубная щетка.

Преимущества традиционных МП систем перед системами с жесткой логикой наглядно показывает сравнение мини-ЭВМ общего пользования, выполненных на различных элементах, приведенное в табл. 9.

Таблица 9

Сравнение характеристик различных вариантов мини-ЭВМ

Наименование характеристик	Значение параметра для варианта мини-ЭВМ		
	Вариант 1 на ИС серии К134	Вариант 2 на ИС серии К155	Вариант 3 на МП БИС серии К583 (ЕС МПК)
Время выполнения короткой операции, мкс	4	1	1
Мощность потребления, Вт	6	60	12
Количество ИС, шт.	1000	1000	20 БИС + 30 ИС

Из таблицы видно, что произведение быстродействия на мощность потребления у мини-ЭВМ на МП БИС серии К583 вдвое меньше, чем у мини-ЭВМ на ИС серии К134, и в 5 раз меньше, чем у мини-ЭВМ на ИС серии К155.

Как показывает анализ эффективности применения систем на БИС МП по сравнению с системами на ИС, большинство задач, не требующих особо высокого быстродействия, может быть успешно решено на основе МП систем, построенных традиционными методами.

21. Общие рекомендации по выбору и применению микропроцессоров

Прежде чем приступить к вопросу о выборе МП, выясним, в каких же случаях вообще МП эффективнее жесткой (непрограммируемой) логики.

На рис. 19 приведен своеобразный алгоритм поиска наиболее подходящей элементной базы для вычислительной системы, отражающий соображения пользователя, который выбирает между ИС и БИС МП. Из рисунка видно, что применение жесткой логики оправдано в двух случаях — при необходимости получения сверхвысокого быстродействия в реализации сложных алгоритмов и, наоборот, в простейших системах с небольшим числом ИС малой и средней степени интеграции — специализированных цифровых автоматах. Если же требуется гибкость, т. е. частое изменение функций программным путем, или же ожидается расширение круга решаемых задач в будущем, а система достаточно сложна — используется МП.

Таким образом гибкость МП, а также связанная с ней особенность разработки МП систем, выражающаяся в замене логического проектирования программированием требуемых функций, оказываются решающим отличием от непрограммируемой логики.

Решив применить МП, разработчик вычислительной системы должен выбрать наиболее подходящий для своей задачи микропроцессор на основании сопоставительного анализа совокупности его характеристик и совокупности заданных требований. Безусловно, на такой выбор, как, впрочем, и на выбор других элементов аппаратуры, влияет множество трудно учитываемых факторов с широким диапазоном значимости каждого — от возможности приобрести тот или иной тип до личной симпатии разработчика. Однако, не претендуя на полноту раскрытия вопроса, остановимся на связи некоторых свойств МП и систем на их основе.

Как же выбрать микропроцессор? Частично, ответ на этот вопрос уже дан в гл. 1 и 2 при описании характеристик МП и их классификации. Здесь же

покажем, как связаны эти характеристики с такими особенностями МП систем, как их архитектура, вычислительная мощность, гибкость, сложность проектирования, габариты, масса и экономичность.

Под архитектурой МП системы понимается структура, построение и принципы организации аппаратных и программных средств, рассматриваемые не «изнутри» — с точки зрения разработчика, а «снаружи» — с точки зрения *пользователя* МП системы.

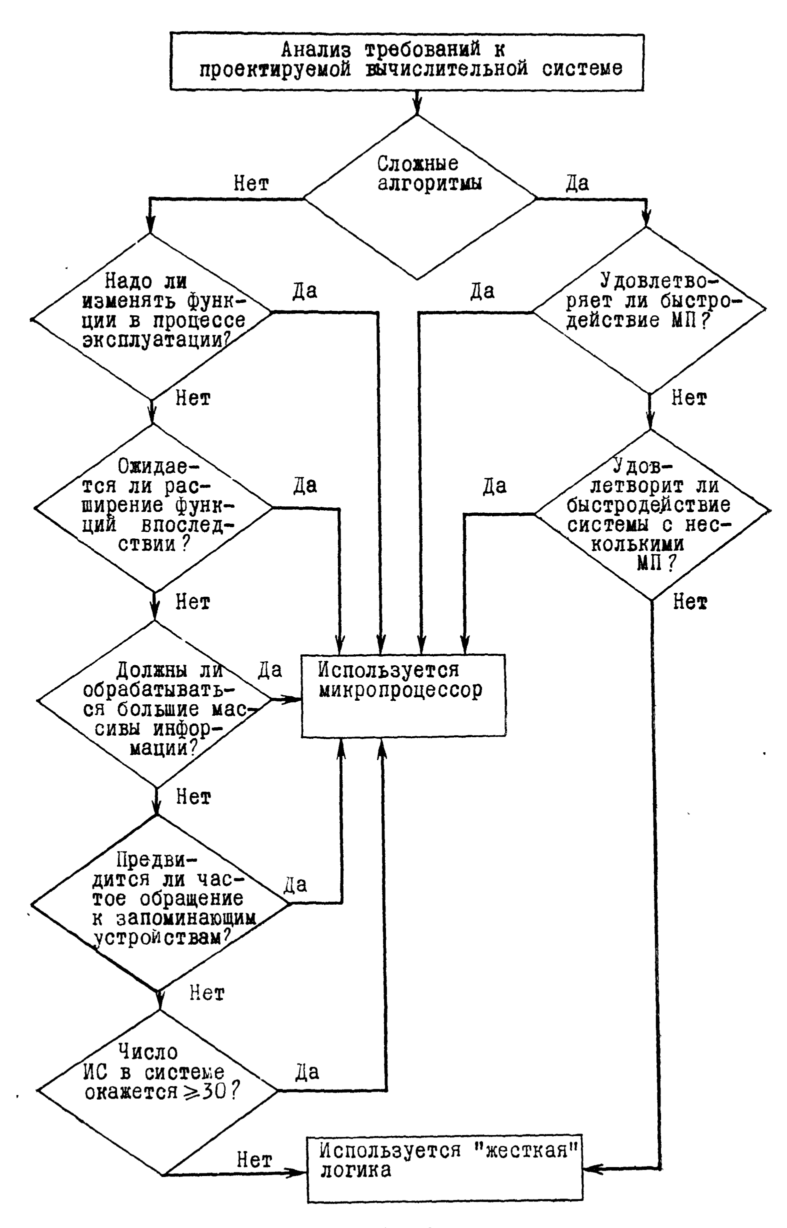


Рис. 19. БИС МП или ИС?

Одна и та же характеристика, например разрядность МП, может принадлежать внутренней структуре, если речь идет о внутреннем построении МП, или архитектуре, если говорят о точности, которую необходимо обеспечить в результате использования в системе МП с той или иной разрядностью.

Таблица 10 дает представление о связях упомянутых выше характеристик МП системы с характеристиками МП.

Таблица 10

Связь характеристик МП и МП системы

Характеристики МП	Характеристики МП системы				
	Архитектура	Вычислительная мощность	Гибкость	Сложность проектирования	Эксплуатационные факторы, габариты, масса, экономичность
Разрядность	+	++	+	—	+
Число внутренних регистров	++	++	+	—	—
Наличие стековой организации	++	+	—	—	—
Быстродействие	+	++	—	—	++
Микропрограммирование	++	+	++	++	—
Прерывание	+	+	++	+	—
Раздельные шины данных, адресов и управления	+	++	+	+	+
Флаг	+	+	++	—	—
Электрика, механика	—	—	—	+	++
Наличие в МПК схем интерфейса и памяти	+	—	—	++	—
Стоимость	—	++	—	++	++

Знак «—» означает отсутствие, «+» — наличие, а «++» — определяющее влияние такой связи на характеристики МП системы. Из таблицы видно, что микропрограммирование, например, являясь важной особенностью архитектуры, определяет гибкость и значительно усложняет проектирование, что означает необходимость использования специальных систем проектирования. Фирма «Интел», например, выпускает систему типа MDS800, позволяющую полностью спроектировать аппаратные и программные средства МП систем на основе МПК типов MCS-80 и 3000.

Данные, приведенные в табл. 8 и 10, позволяют выбрать МП для системы, удовлетворяющей определенным требованиям.

Пусть необходимо спроектировать простой контроллер для управления технологическим процессом по единственному или небольшому числу заранее определенных алгоритмов (т. е. относительно негибкий), малого быстродействия, с погрешностью около 1%, без особых требований к эксплуатационным факторам, габаритам, массе, заменяющий 20—30 ИС малой степени интеграции.

Требование простоты проектирования согласно табл. 10 предполагает, прежде всего, отсутствие микропрограммирования, что согласуется с отсутствием требования к гибкости, а также наличие в МПК схем интерфейса и памяти. Малое быстродействие означает возможность использования одной из МОП микропроцессорных технологий, погрешность в 1% требует использования 8-разрядной длины информационного слова.

Кроме того, МП может иметь небольшое число внутренних регистров и быть относительно недорогим.

Этим требованиям согласно табл. 8 отвечает МПК серии К580 (n-МОП, 8 разрядов, время выполнения операции сложения — 2 мкс, жесткое макропрограммное управление, есть схемы интерфейса).

Гибкая, быстродействующая 16—24-разрядная МП система, заменяющая до 1000 ИС малой степени интеграции, должна, очевидно, содержать несколько

процессорных секций малой разрядности (2, 4 или 8), биполярной технологии (ТТЛШ, И^{2}Л или ЭСЛ) с микропрограммным управлением.

В табл. 8 этим требованиям отвечает МП серии К589 — микропрограммируемая двухразрядная процессорная секция, использующая схемотехнику ТТЛШ. Объединение 8—12 таких секций дает требуемую разрядность системы, а время выполнения операции сложения, равное 100 нс, позволит получить высокое быстродействие. Наличие 10 РОН (больше, чем у МП серии К580), возможность прерываний, разделение шины данных, адресов и управления способствуют реализации высокой вычислительной мощности, гибкости, экономичности.

Примером построения 32-разрядной универсальной микро-ЭВМ с быстродействием 100 тыс. операций/с может служить модель «Электроника НЦ-03», построенная на МПК серии К587.

Быстродействующая, экономичная, большой разрядности, гибкая и относительно сложная МП система для работы в широком диапазоне эксплуатационных факторов может быть построена на базе МПК серии К583. Схемотехника И^{2}Л, по которой она изготовлена, обеспечивает наибольшее быстродействие при малой потребляемой мощности. Восьмиразрядные процессорные секции позволяют наращивать разрядность, микропрограммирование обусловливает гибкость. Однако относительная сложность проектирования такой системы и ее стоимость будут, как следует из табл. 10, наибольшими.

Приведенные примеры никоим образом не исчерпывают возможностей применения МПК серий К580, К583, К587 и К589, в них рассмотрены лишь наиболее характерные случаи, помогающие понять, какие особенности необходимо учитывать при выборе модели МП для того или иного применения.

Глава пятая

ПРИМЕРЫ КОНКРЕТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

22. Сферы применения микропроцессорных систем

Как уже не раз отмечалось, особые свойства МП позволяют чрезвычайно широко использовать системы на их основе, причем разнообразие применений ограничивается, скорее, фантазией разработчиков, чем возможностями самих МП. К настоящему времени наметился целый ряд направлений применения таких систем, и сообщения об их дальнейшем развитии или распространении на новые сферы человеческой деятельности появляются все чаще.

Уже сегодня эффективное использование МП системы находят:

для управления и контроля производственных процессов в системах сбора данных, автоматизированных технологических линиях, станках с числовым программным управлением;

в системах обработки и представления информации при решении научно-технических, инженерных, экономических и других задач в качестве универсальных или специализированных микро- и мини-ЭВМ;

в технике связи для осуществления коммутации, мультиплексирования, расширения функциональных возможностей связных устройств, в аппаратуре кодирования;

в измерительной технике для повышения точности измерений, автоматизации измерительного процесса, расширения функциональных возможностей путем реализации методов автоматической коррекции погрешностей, самокалибровки, самодиагностики, цифровой обработки измерительной информации;

в технике физического эксперимента для повышения гибкости, универсальности использования экспериментального оборудования, автоматизации исследовательского процесса;

для автоматизации управления движением транспортных потоков, транспортных средств и режимом работы двигателей, для контроля за соблюдением правил дорожного движения и обеспечения других мер повышения безопасности движения;

в бытовых приборах и электронных играх для автоматизации управления и расширения функциональных возможностей;

в торговой и служебной аппаратуре для автоматического выполнения финансовых операций, в аварийных и охранных системах;

в медицинской технике в системах сбора и регистрации информации о состоянии больных, для автоматизации обследования и диагностики заболеваний.

Приведенный перечень не следует рассматривать как специфичный для применения МП. Просто потребность использования МП в этих сферах назрела раньше, чем в остальных, либо сыграли роль другие, не всегда объективные, причины. Так или иначе, отчасти следуя этому достаточно сложившемуся за рубежом делению, покажем, как участвует МП в информационных процессах, протекающих в системах контроля или управления.

К двум указанным категориям в конечном счете можно свести любую систему преобразования информации. Этот несколько неожиданный тезис нетрудно принять, если определить принадлежность системы к той или иной категории по степени участия человека в информационном процессе.

Системой контроля здесь будем называть систему, имеющую вход для приготовленного заранее массива данных или информации от датчиков контролируемого процесса или объекта, и выход, сигналы которого предназначены для восприятия человеком-оператором. Принимая решения в соответствии с полученной с выхода системы информацией, оператор корректирует процесс, замыкая, таким образом, цепь обратной связи: объект — система контроля — человек — объект.

Управляющая система отличается от системы контроля тем, что решение о необходимости той или иной коррекции принимается самой системой, и корректирующие (управляющие) сигналы также вырабатываются в ней, поэтому цепь обратной связи объект — управляющая система — объект замкнута без участия человека в информационном процессе.

Системы, управляющие непрерывными временными процессами с достаточно высокой дискретизацией, определенной соотношением между скоростью изменения параметров управляемого объекта и быстродействием самой системы, называют работающими в реальном масштабе времени. Это, пожалуй, самый важный и интересный класс систем, возможности которых еще эффективней реализуются с применением МП.

23. Микропроцессоры в системах управления и контроля производственных процессов

Интересным примером использования МП системы для контроля технологического процесса может служить разработанная в Вашингтонском университете система сортировки пиломатериалов, измеряющая параметры древесины неразрушающими методами и представляющая полную информацию об образце в цифровой форме [12]. Система позволяет эффективно определять пригодность древесины для того или иного способа дальнейшей обработки с учетом размеров, массы и плотности образца. По утверждению авторов, полный анализ свойств одного образца занимает менее 2 с, что особенно важно для использования системы на поточной линии. На разработку аппаратных и программных средств были затрачены усилия четырех человек в течение месяца, причем не потребовалось специальной оснастки или измерительного оборудования.

Рисунок 20 поясняет работу такой системы.

Основным фактором, позволяющим судить о качестве древесины, является модуль упругости, однозначно определяемый произведением плотности на квадрат скорости распространения в образце ударной волны. Плотность вычисляется процессором по непрерывно регистрируемым значениям длины, ширины, толщины и массы образца, а скорость распространения ударной волны — по времени задержки ее фронта на фиксированных расстояниях вдоль образца. На индикаторную панель выводится информация о текущем и усредненном по длине значении модуля упругости, местоположении участка образца с наименьшим модулем, минимально допустимое значение модуля, плотность образца и время.

Механическая часть системы включает ударный механизм, синхронизируемый импульсами, заданными процессором, датчики фронта ударной волны для

измерения текущего значения времени ее распространения, датчики размеров и массы. Процессорная часть построена на основе МП фирмы «Моторола» модели МС6800.

На МП систему возложены следующие задачи:

пуск и останов счетчика времени с началом и окончанием испытания каждого образца;

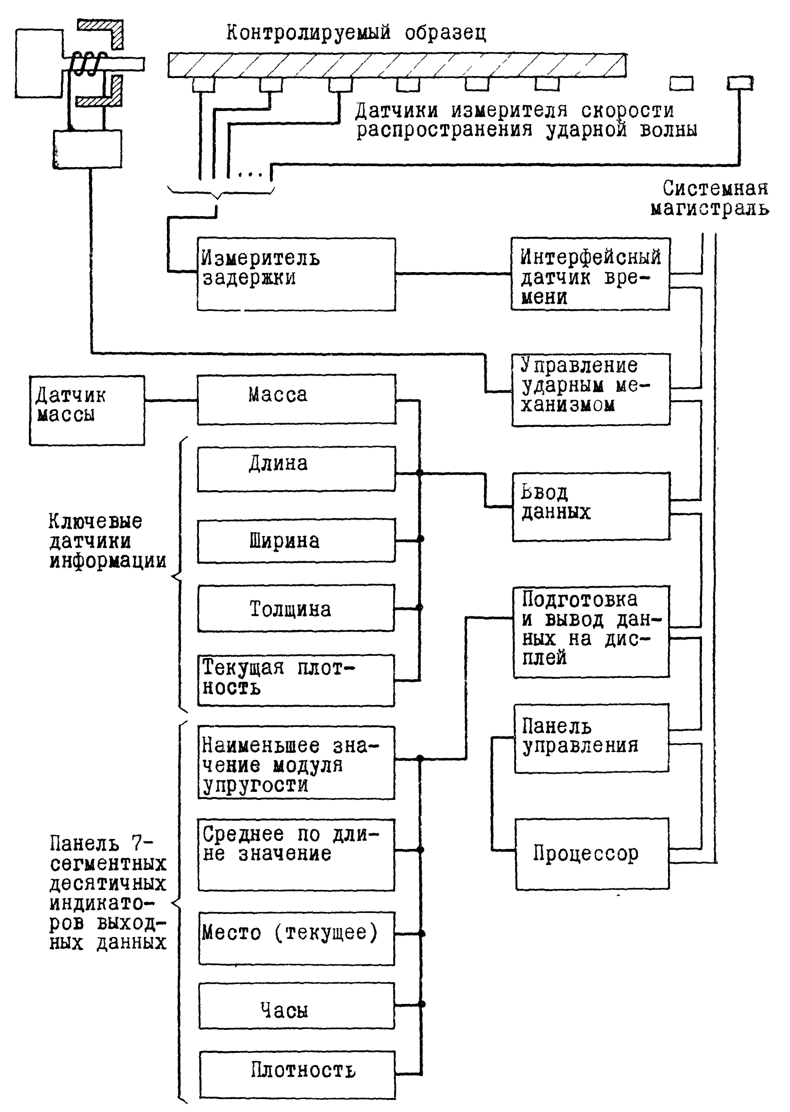


Рис. 20. Функциональная схема системы сортировки пиломатериалов.

вывод на индикаторную панель номера образца и контрольных значений массы, размеров, плотности и модуля упругости;

управление ударным механизмом;

фиксация значений времени задержки фронта ударной волны и отключение соответствующего датчика до запуска новой волны во избежание реакции на отраженные волны (повышение помехозащищенности);

прием данных о длине, ширине, толщине, массе и времени задержки;

вычисление плотности;

вычисление наименьшего модуля упругости по максимальному времени задержки;

вычисление усредненного значения модуля упругости;

нахождение образцов с наименьшим модулем упругости (отбраковка) и определение координаты участка образца с наименьшим модулем;

вывод результатов на индикаторную панель.

Информация от аналоговых датчиков размеров и массы преобразуется с помощью аналого-цифровых преобразователей в цифровой двоичный код, вводимый по системной магистрали в МП в качестве входных данных. Туда же поступают импульсы временного счетчика, число которых пропорционально временам задержки фронта ударной волны на различных участках образца.

Процессорная часть системы без изменений может быть использована для других применений, так как при проектировании в нее были заложены более широкие возможности, чем требует того данная задача. Это касается, в частности, канала прямого доступа к памяти, использование которого не является здесь необходимым, но делает систему более универсальной.

Микропроцессорная система собрана на трех платах — собственно МП, управления и памяти, объединенных системной магистралью (СМ).

Плата МП кроме самого центрального процессора включает магистральные усилители (МУ) и небольшое количество логических схем малой степени интеграции (рис. 21).

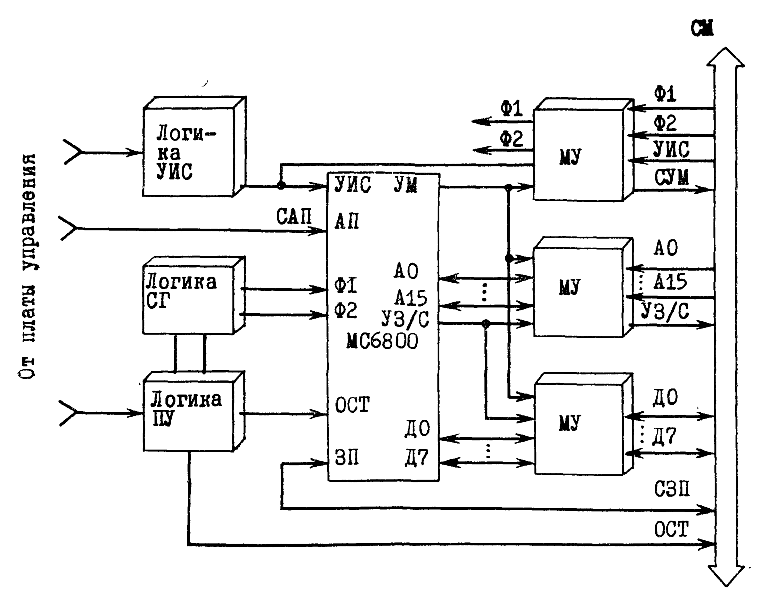


Рис. 21. Структура платы МП.

С системной магистралью плата сообщается шинами адресов (А0—А15), данных (Д0—Д7) и управления. К последним относится шина установки исходного состояния (УИС), запроса на прерывание (СЗП), останова (ОСТ), синхронизации (Ф1 и Ф2) и управления записью/считыванием (УЗ/С) адреса. Кроме того, плата МП непосредственно соединена с платой управления шинами УИС, прерывания при аварии питающей сети (САП), управления магистралью (УМ) и пошагового управления (ПУ).

Сигнал установки исходного состояния вырабатывается в момент включения питания и вызывает из ПЗУ специальную программу, устанавливающую в нуль все счетчики и регистры МП. Такой же сигнал может быть подан с панели управления в любой момент выполнения программы. После УИС из ПЗУ автоматически выбирается первая команда, начинающая рабочую программу.

Прерывания могут осуществляться в двух случаях — после ответа на сигнал запроса прерывания, периодически вырабатываемый управляющей платой, а также при недопустимом отклонении величины питающего напряжения от номинального.

Первому способу соответствует сигнал СЗП, второму — САП.

Синхрогенератор с формирующей логикой, размещенный на плате МП, вырабатывает две фазы импульсов с тактовой частотой 500 кГц, определяющих динамику работы всей процессорной части. Тактовая частота для МП МС6800 может быть повышена до 1 МГц (см. табл. 8), но в рассматриваемом случае это не приведет к заметному повышению быстродействия системы в целом, поскольку здесь оно определяется механической частью.

Вход останова позволяет останавливать выполнение рабочей программы сигналом с панели управления, а также реализовывать ее пошаговое выполнение, что особенно важно при отладке и поиске ошибок во вновь вводимой программе.

Все выходные сигналы МП поступают в системную магистраль через магистральные усилители, позволяющие увеличить нагрузочную способность, которая у МП МС6800 соответствует всего одному входу обычной ИС ТТЛ.

Коммутация всех шин МП с системной магистралью, за исключением шин Ф1, Ф2 и УИС, производится сигналом СУМ, вырабатываемым в МП. В МП вырабатывается также сигнал управления записью/считыванием, служащий для реализации естественной последовательности этих операций при выполнении команды.

Управляющая плата, так же как и плата МП, спроектирована как универсальный элемент структуры, допускающий различные применения без каких-либо изменений.

На ней размещены дешифратор адреса (ДА), регистр данных (РД), регистр сигналов от панели управления (РП), логика обслуживания прерываний (ЛП) и генераторы сигналов для панели управления (ГП), управления состояниями процессора (ГУ), останова и пошагового управления (ГО и ПУ), аварийного прерывания (АП) (рис. 22).

Дешифратор адреса ДА преобразует двоичный 16-разрядный код адреса в сигналы, непосредственно управляющие работой всей процессорной части с данными, представленными по этому адресу.

Сигналы управления вырабатываются генераторами ГУ, ГП, ГА, ГО и ПУ. Прерывание организуется выработкой сигнала запроса на прерывание ЗП, который периодически опрашивает все требующие его устройства и в случае ответа (сигнал СОП) останавливает процесс для вывода или ввода информации по системной магистрали СМ. Сигнал управления состоянием процессора УСП определяет состояние процессора в течение каждого цикла, а также его начало и конец.

При пошаговом выполнении программы, задаваемом с панели управления, содержание регистра данных РД индицируется на панели сигналами, вырабатываемыми генератором ГП.

Генератор сигналов останова и пошагового управления ГО и ПУ вырабатывает соответствующие сигналы по команде с панели управления.

Прерывание, наступающее в результате аварии питания и обеспечиваемое генератором АП, отличается от останова тем, что после установления необходимого значения питающего напряжения система автоматически устанавливается в исходное состояние и продолжает функционирование с первой команды рабочей программы. После останова же, как и после прерывания для обмена информацией с периферийным устройством, программа продолжает выполняться с того шага, на котором она была прервана.

Сигналы СПУ, САП и УИС поступают на плату МП, минуя магистраль СМ, все остальные сигналы платы управления передаются по ней.

Память процессора также размещена на отдельной плате и допускает как произвольное наращивание своего объема, так и изменение структуры. В данном случае полный объем памяти 32 Кбит, из которых 2048 байтов или 8-битных

слов (16 Кбит) отводятся под хранение рабочей программы. В процессе выполнения программы эта информация может быть только считана, причем в единственной, задаваемой самой программой последовательности. Остальные 16 Кбит образуют ОЗУ, т. е. могут быть произвольно считаны и записаны, причем 1 Кбит служит для оперативного хранения информации от ввода/вывода периферийных устройств.

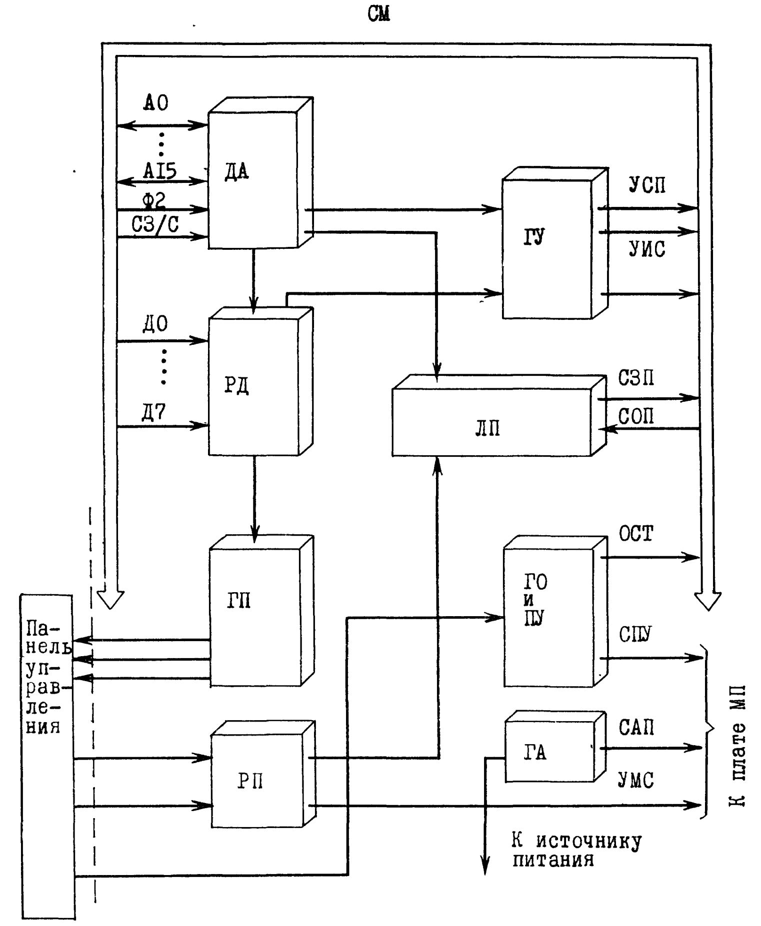


Рис. 22. Структура платы управления.

На рис. 23 приведен пример объединения трех плат описанного процессора с двумя периферийными устройствами. Все входы/выходы плат объединены параллельной магистралью, за исключением вывода сигнала СОП, который проходит периферийные устройства последовательно, что определяет временной приоритет осуществляемых по нему прерываний. От процессорной части описываемой системы сортировки пиломатериалов данный пример отличается только меньшим числом периферийных устройств, подключаемых к системной магистрали.

В системе сортировки пиломатериалов прерывание может быть вызвано тремя причинами. Первая причина — проверка правильности функционирования системы оператором с помощью ключей на панели управления. Вторая — сигнал *Пуск*, задаваемый с панели управления, и третья — сигнал окончания измерения скорости распространения ударной волны и начала обработки полученных в результате измерения данных.

Описанная система контроля служит примером наиболее простого использования МП с точки зрения выполняемого им алгоритма и требуемого при этом быстродействия. На практике гораздо более распространенной оказывается задача управления производственными технологическими процессами в реальном масштабе времени, решаемая в настоящее время средствами аналоговой и цифровой автоматики на базе централизованных вычислительных систем относительно высокой производительности.

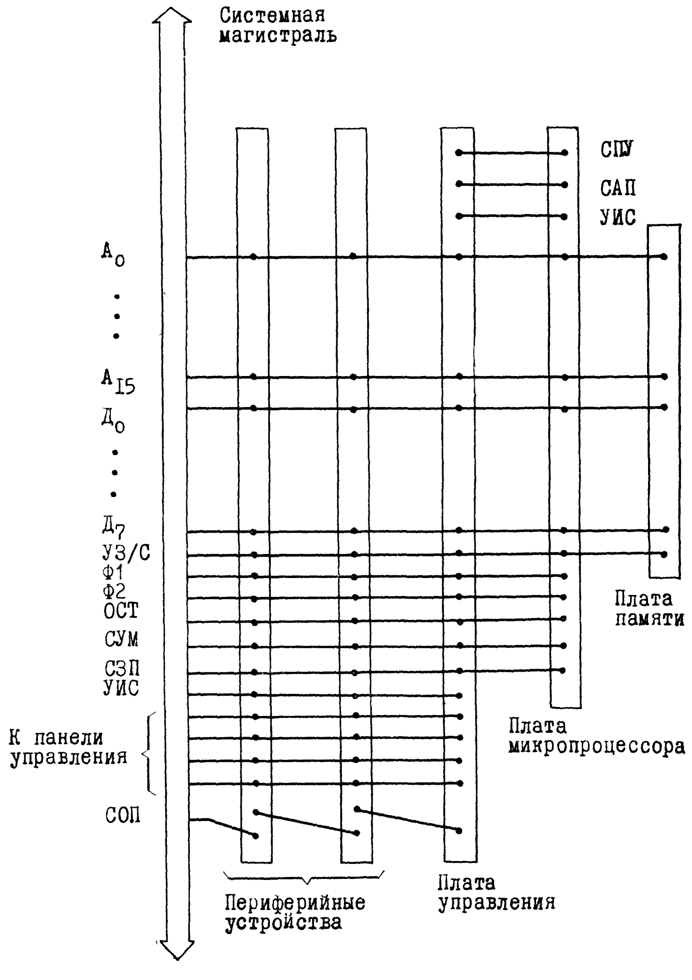


Рис. 23. Вариант объединения в систему процессора, памяти и двух периферийных устройств.

Преимущественным для такого управления был и остается пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) метод, сущность которого поясняет рис. 24. Метод заключается во введении многоконтурной обратной связи, главный контур которой осуществляет только интегральное (И) регулирование и охватывает контуры пропорционального (П) и дифференциального (Д) регулирования [13].

Сигнал ошибки вырабатывается в результате сравнения выходного сигнала (регулируемой переменной) с некоторым заданным извне параметром (устав-

кой). Само значение регулирующей переменной зависит от величины и времени действия (т. е. результата интегрирования) сигнала ошибки, а также скорости изменения и текущего значения (т. е. результата дифференцирования и линейного преобразования) выходного сигнала.

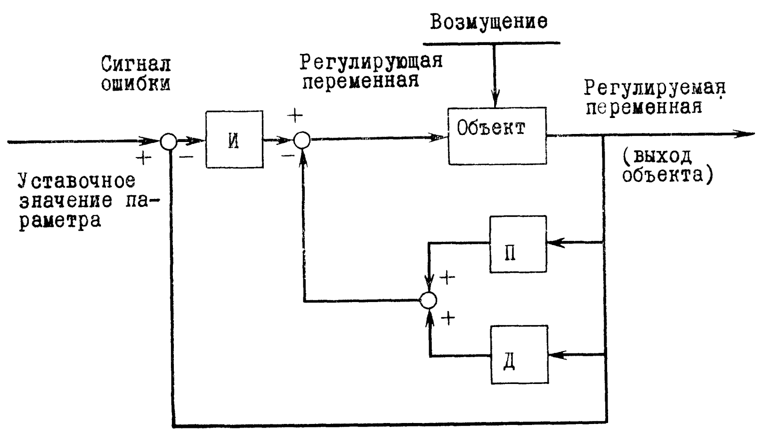


Рис. 24. Функциональная схема регулятора, реализующего метод пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) управления.

Метод ПИД управления уже почти полвека является основным в системах автоматического управления производственными процессами и при правильном использовании дает весьма хорошие результаты. С переходом от аналоговых регуляторов к цифровым контроллерам для последних составлялись программы, моделирующие аналоговые законы регулирования. Так возник цифровой алгоритм ПИД регулирования, обладающий большей гибкостью, чем аналоговый.

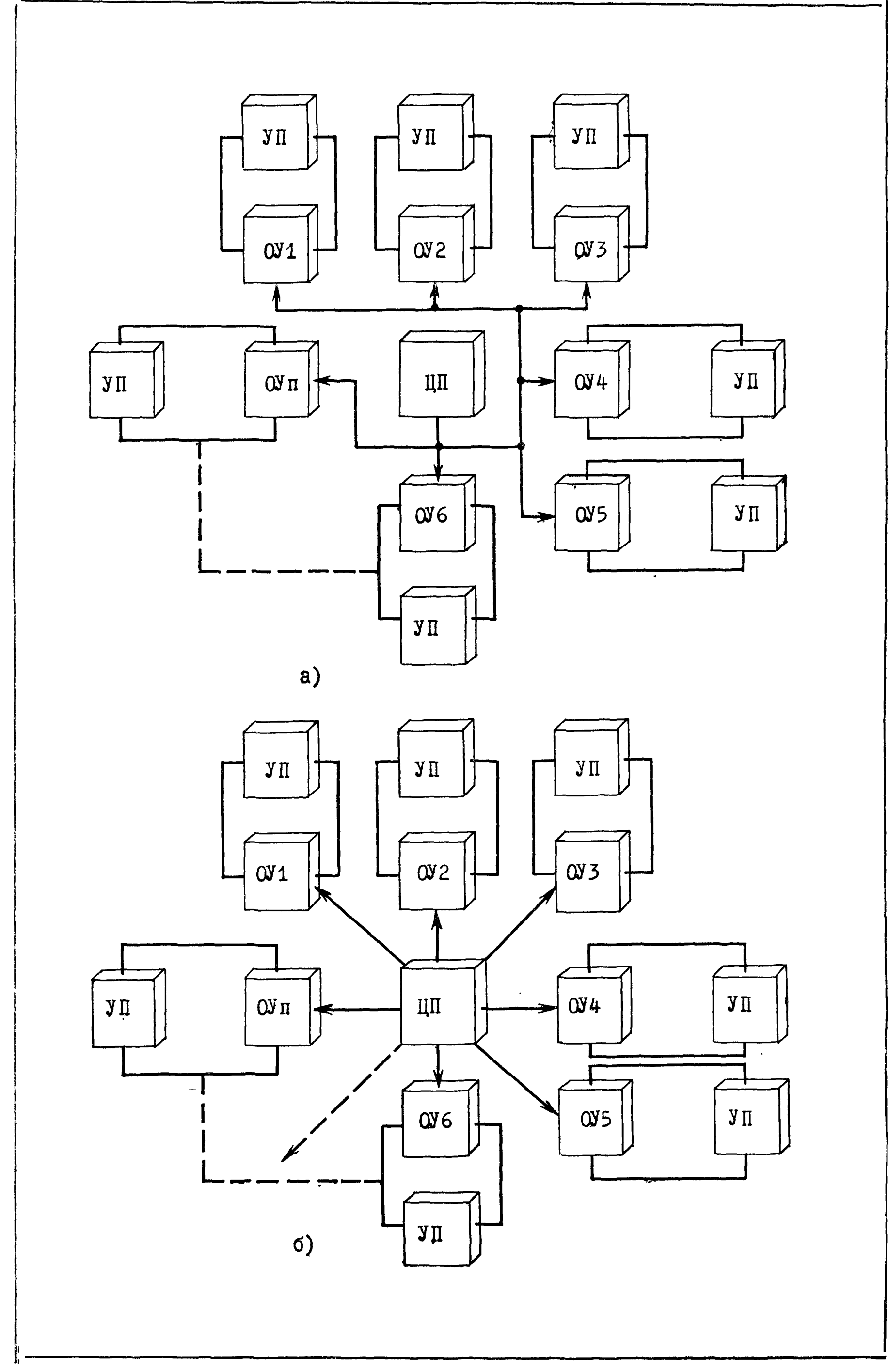
Цифровая ЭВМ для управления технологическим процессом впервые была установлена на химическом заводе в США в 1959 году. Осуществляя централизованное цифровое управление, она занимала верхнюю ступень в иерархии управляющей системы и задавала уставки распределенным аналоговым регуляторам.

Управляющие мини-ЭВМ, а вслед за ними и МП системы дали начало следующему этапу развития аппаратуры для автоматического управления процессами. Переход от централизованных вычислителей к распределенным дал возможность качественно по-новому решать задачи управления и в том числе с использованием ПИД метода.

Распределенное управление было единственным методом, применявшимся до появления ЭВМ, однако микропроцессорный вариант распределенного управления имеет существенные отличия, определяющие его преимущества как перед аналоговым, так и перед централизованным цифровым методом. Это отличие заключается, прежде всего, в использовании магистрали данных, т. е. одно- или многопроводной линии, связывающей все контуры «объект управления (ОУ) — управляющий процессор (УП)» с центральным процессором (ЦП), организующим работу всей системы и выводящим оперативную информацию о ее работе на дисплей (рис. 25,*а*, *б*).

Считается, что такие комплексы сочетают надежность аналоговых систем с универсальностью, разнообразием алгоритмов и централизованным хранением информации, что характерно для цифровых систем.

Важной особенностью систем распределенного управления является их высокая живучесть, которая означает, что отказ каждого из самостоятельных контуров управления низшего уровня не приводит к потере работоспособности всей системы, т. е. имеет менее серьезные последствия, чем отказ процессора в централизованной системе.


УП
УП
УП
ОУ1
ОУ2
ОУ3
УП
ОУп
ЦП
ОУ4
УП
ОУ6
ОУ5
УП
УП
а)
УП
УП
УП
ОУ1
ОУ2
ОУ3
УП
ОУп
ЦП
ОУ4
УП
ОУ6
ОУ5
УП
УП
б)

Основными проблемами, которые приходится решать при проектировании и внедрении распределенных систем управления производственными процессами, считаются:

обеспечение высокой достоверности передачи цифровых данных по линиям значительной протяженности (порядка десятков и сотен метров) в условиях интенсивного воздействия промышленных электромагнитных помех;

повышение помехозащищенности цифровых буферных устройств, работающих на магистраль;

создание специального интерфейса для обмена информацией между периферийными контурами управления и центральным процессором.

В настоящее время несколько зарубежных фирм производят МП системы для распределенного управления производством. Так, фирма «Хонивелл» (США) предлагает пользователям систему, способную управлять 128 контурами для каждого из дистанционных оконечных устройств, число которых может наращиваться. Тридцать два контура управляются одним дистанционным оконечным устройством в МП системе фирмы «Йокогава» (Япония). Обе системы используют для передачи данных коаксиальные кабели.

С внедрением МП систем, характерных малыми размерами и невысокой стоимостью, резко увеличивается число производственных процессов, цифровое управление которыми экономически оправдано. Это увеличение обусловлено возможностью управления на низких уровнях, вплоть до отдельных технологических операций. Так, кроме фирм «Хонивелл» и «Йокогава», которые поставляют свои дистанционные оконечные устройства отдельно в качестве малых многоконтурных встроенных систем, фирма «Бристол» (США) производит управляющую систему на МП, имеющую восемь контуров, а фирма «Межурекс» — систему, управляющую шестью контурами. Эти МП системы являются примерами малых, низкоуровневых автономных систем управления производственными процессами.

24. Микропроцессорные системы для расширения функций и улучшения основных характеристик аппаратуры связи

Аппаратура связи была и остается важнейшим объектом применения цифровой вычислительной техники, а использование в связных устройствах МП открывает здесь новые перспективы. Еще в 1976 г. по данным журнала «Электроникс Иквипмент Ньюз» 16% (по стоимости) всех выпускаемых в мире МП использовалось для нужд связи. Эта цифра покажется особенно значительной, если учесть, что в промышленной технологии в этот год нашло применение 15% МП, в измерительной технике — 10%, на транспорте — 4% [14].

Одной из первых сфер применения МП оказалась телефония. Еще в 1974 г. фирмой «Честер Корпорейшн» (США) создана автоматическая телефонная станция индивидуального пользования BCS-50, построенная на базе МП модели 8008 [15]. МП здесь обслуживает мультиплексный режим работы, распределяя информацию по временным интервалам (о мультиплексировании см. § 1, с. 11), а также управляет соединением, отключением и другими состояниями абонентских точек. Особенности или ограничения для каждого абонента хранятся в ПЗУ. Той же фирмой впоследствии разработана вспомогательная МП система, предназначенная для работы совместно с BCS-50, названная SMDAS. В основу ее заложен МП модели МС6800. SMDAS служит для соединения и поддержания связи по любому заранее заданному временному графику.

В 1977 г. опубликовано сообщение о создании автономной радиотелефонной системы модели GL2000, сопряженной с телефонной сетью США и Канады [16]. Система использует МП IM6100 и осуществляет:

поиск и установление связи по любому свободному каналу абонентской телефонной сети;

автоматический двухтональный вызов;

←

Рис. 25. Магистральный способ объединения контуров «объект управления (ОУ) — управляющий процессор (УП)» в управляющую систему с разветвленной магистралью (*а*) и независимым подключением контуров «ОУ—УП» (*б*).

реперный набор (позволяет нажатием одной из 10 кнопок вызывать любого из 10 абонентов с 10-значными номерами, запрограммированными ранее);

повторение вызова занятого номера;

индикацию текущего времени и соединение в заданный момент времени.

Оконечное устройство имеет небольшие размеры и массу и может быть установлено, например, в автомобиле.

В недалеком будущем использование МП в телефонных системах позволит, по-видимому, решить проблему преобразования звуковых сигналов в цифровой код и обратно для передачи по линиям связи только цифровой информации.

Вообще, от телефона будущего применение МП позволяет ожидать реализации таких свойств, как:

кнопочный набор с преобразованием сигнала в импульсы дискового набора;

передачу тональных вызывных сигналов с управлением их амплитудой и частотой;

отображение на цифровом индикаторе: времени суток, продолжительности соединения, набираемого номера, последнего набранного номера, номера, повторно передаваемого из ЗУ автонабора, номера другого абонента, участвующего в соединении;

внутреннее удержание линии с индикацией удержания;

автонабор по номерам, хранящимся в ЗУ, с возможностью их перезаписи;

повторный набор последнего набранного номера при нажатии кнопки «Повторный набор»;

программирование номеров для экстренных соединений при нажатии одной кнопки;

индикацию выполняемых в данный момент функций;

подключение к внутренним линиям связи;

использование блока связи с системой передачи данных и передачи музыки по линии, находящейся в состоянии удержания [17].

Помимо телефонной связи широкие перспективы открывает использование МП в связной радиоаппаратуре. Примером может служить сообщение о применении МП МС6800 в двух стационарных радиостанциях мощностью 100 и 400 Вт, служащих для установления двусторонней связи большого числа раций ранцевого типа, обслуживаемых операторами на передовых позициях, с командным пунктом, который может находиться на значительном удалении как от самих позиций, так и от стационарной радиостанции, выступающей в качестве ретранслятора [18].

В диапазоне 2—30 МГц с помощью МП осуществляется автоматическая настройка на фиксированную частоту с дискретностью 100 Гц за 1,5 с. Кроме того, МП управляет работой высокоскоростного вакуумного реле-переключателя, изменяющего реактивность ВЧ тракта, компенсируя тем самым изменение импеданса антенны на различных рабочих частотах и полностью автоматизируя настройку антенны.

Высокие показатели ретранслятора, полученные за счет применения в нем встроенной МП системы, позволили значительно сократить массу и размеры ранцевых приемо-передающих станций. При мощности передатчика 10 Вт такая станция имеет массу 7 кг и объем около 3 дм^3.

25. Микропроцессорные системы для повышения точности и автоматизации измерений

Применение МП в измерительных приборах позволяет добиться целого ряда положительных результатов, не достижимых иными средствами. Наиболее характерными требованиями к измерительной аппаратуре являются требования к точности и ее сохранению в течение длительного времени в широком диапазоне воздействий дестабилизирующих факторов. Для компенсации временной и эксплуатационной нестабильности, вызывающей изменение функции преобразования измеряемой величины в наблюдаемую, почти всегда необходима калибровка приборов непосредственно перед измерением или с некоторой периодичностью, соответствующей поверочному интервалу времени. Это, как правило, относительно трудоемкая операция и часто недостаточно эффективная, поскольку

параметры прибора могут довольно быстро изменяться в течение времени измерения. С целью уменьшения погрешности, вызываемой такими изменениями, рекомендуются предварительный прогрев измерительного прибора или выдержка его во включенном состоянии до начала измерений, что, естественно, снижает возможность оперативного использования или просто делает прибор неудобным в обращении.

Одной из важных функций, возлагаемых на МП, используемый в составе измерительной аппаратуры, является поэтому функция автоматической самокалибровки, причем осуществляемой не только перед измерением, но и в процессе воздействия сигнала измеряемой величины на вход измерителя. Частота такой калибровки может быть достаточно большой для проведения большого числа калибровок за время одного измерения.

Другая важная возможность, обеспечиваемая применением МП в измерительном приборе, это возможность предварительной обработки выходной информации собственно измерителя с целью расширения функциональных возможностей и улучшения характеристик измерительного прибора в целом. В результате такой обработки можно производить автоматическое усреднение результатов измерений, приведение величин к заданной размерности, выбор оптимального диапазона измерения, вычисление заданных функций и т. п., другими словами, получать от измерения именно ту информацию, которая требуется в каждом конкретном случае.

И, наконец, третье существенное достоинство, реализуемое с использованием МП, заключается в возможности самоконтроля и диагностики измерительного прибора, т. е. в обнаружении и указании местоположения обнаруженной неисправности, а если возможно, то и устранения ее путем подключения резервных устройств или выбора подходящего режима работы. Это свойство особенно важно для автономных измерительных систем с высокой надежностью, какими являются, например, системы контроля и диагностики космических аппаратов.

Немаловажным также является уменьшение размеров, массы и энергопотребления измерительных устройств, в которых перечисленные выше свойства реализованы с использованием МП.

Одним из первых цифровых измерительных приборов, реализующих преимущества применения МП, является 5,5-разрядный мультиметр 7115 фирмы «Систрон Доннер» (США) со встроенным МП модели 4004 [19].

Он измеряет напряжение постоянного тока, действующее значение переменного тока, сопротивление и отношения этих величин. МП осуществляет программируемую связь реальной функции преобразования измерителя с заложенными в память константами, т. е. автоматическую самокалибровку, а также статистическое усреднение показаний, линеаризацию измеряемых величин и предварительную обработку результатов измерений по заданной программе.

Перечисленные функции позволяют примерно в 5 раз увеличить точность прибора: погрешность составляет 0,002% значения измеряемой величины и 0,001% предела измерения, тогда как погрешность большинства 5,5-разрядных мультиметров без МП составляет не менее 0,01% значения измеряемой величины.

Увеличение точности достигнуто за счет исключения влияния на результаты измерений температуры окружающей среды, «старения» элементов (перед автоматической установкой на нуль прибор измеряет дрейф, запоминает его, а затем вычитает из значения измеряемой величины), а также случайных выбросов измеряемой величины (путем усреднения достаточно большого числа измерений).

В неменьшей степени точность прибора повышена за счет уменьшения погрешностей, связанных с нестабильностью внутреннего источника образцового напряжения (меры). В процессе самокалибровки прибор сравнивает текущее значение напряжения образцового источника с его цифровым эквивалентом, заложенным в память в виде соответствующего цифрового кода. Результат сравнения запоминается и используется для соответствующей корректировки измеренного значения входной величины.

По существу, в таком приборе образцовой мерой является цифровой код, по которому в каждом цикле измерений поверяется источник образцового напряжения, выполняющий, по сути, функцию вторичной рабочей меры. Погреш-

ности, связанные с нестабильностью образцовой меры, в этом случае исключены полностью и точность такой поверки определяется исключительно разрядностью цифрового кода и погрешностью цифро-аналогового или аналого-цифрового (в зависимости от сравнения в аналоговой или цифровой форме) преобразования.

Другим интересным примером применения МП в измерительной технике может служить осциллограф модели 1722А фирмы «Хьюлетт Пакард» (США) [20]. В нем для измерения временных интервалов используется метод так называемой двойной задержанной развертки. Достоинства метода — наиболее высокая точность измерения, а также дополнительные функциональные возможности удобного, быстрого и точного измерения типовых параметров импульсных сигналов — времени нарастания и спада, длительности импульса на заданном уровне и т. п. Однако этот метод отличается сложностью и только применение встроенного контроллера на базе МП типа 8008 дало возможность его реализовать.

Для измерения оператору достаточно совместить дополнительно подсвечиваемый участок развертки с нужным участком изображения сигнала. Результат измерения длительности, частоты или сигнала, выбираемых нажатием соответствующей кнопки, автоматически высвечивается на цифровом индикаторе. МП обеспечивает установку диапазона измерения, вычисление длительности, частоты, а также преобразование и вывод информации на индикатор. Погрешность измерения временных интервалов 0,7% — наименьшая из достигаемых при визуальном совмещении.

26. Микропроцессорные системы в бытовых приборах и электронных играх

Товары широкого потребления — потенциально наиболее массовая сфера применения МП систем. Высокая надежность и постоянно снижающаяся стоимость МП являются факторами, решающими в их пользу вопрос о выборе элементно-технологической базы для систем автоматизации управления бытовыми приборами взамен аналоговых, дискретных цифровых, электромеханических и других устройств. Не менее привлекательной оказывается возможность получения у бытовых приборов наряду с традиционными новых функций при незначительном увеличении стоимости, что также определяет преимущества МП систем перед всякими другими.

Любое перечисление устройств массового пользования, в которых находят место МП, будет неполным и незаконченным, поскольку сообщения о новых разработках в этой области публикуются непрерывно. Впервые появившись в карманных калькуляторах и электронных часах с дополнительными функциями, МП стремительно завоевывают позиции в товарах широкого потребления, увеличивая к тому же их разнообразие. Сейчас МП прочно обосновались в холодильнике и кухонной СВЧ-печи, в швейной и стиральной машинах, в воздушном кондиционере и системе отопления, в телевизоре и электронной игре, и даже в кофеварке есть обоснованная необходимость и возможность эффективного применения МП.

Часто для таких целей используются универсальные МП, выпускаемые в больших количествах для широкого диапазона применений, однако необходимо отметить, что не менее часто оказывается экономически выгодным разработать специализированные БИС, поскольку объемы их выпуска также могут быть достаточно велики, а именно это условие было и остается решающим для обеспечения экономической эффективности изделий микроэлектроники.

Первоочередной учет экономического фактора и связанная с ним проблема выбора между стандартным МП и изготавливаемым по специальному заказу, пожалуй, и является основной особенностью разработки МП систем для изделий массового пользования.

Примером эффективной замены электромеханического управления цифровым является высококачественный проигрыватель модели «Аккутрак 4000» с беспроводным дистанционным управлением [21]. Он имеет встроенную микро-ЭВМ, позволяющую по заранее введенной с помощью клавиатуры программе проигрывать записи в любой последовательности, менять пластинки, включать и выключать проигрыватель. Стоимость устройства с такими возможностями, реализованными другими способами, была бы неприемлемой.

Еще одним примером такого рода можно считать применение МП для управления режимом работы стиральной машины [2]. Программа, задаваемая перед стиркой с помощью нескольких клавиш, содержит информацию о необходимой температуре воды, времени и особенностях стирки. Микропроцессор опрашивает датчик температуры и в соответствии с ее значением управляет встроенным нагревателем, а также определяет момент включения и выключения электродвигателя. По окончании стирки грязная вода сливается, а двигатель включается для отжима. Если программа предусматривает стирку шерстяных изделий, отжим не производится. Кроме того, МП блокирует электропитание в случае возникновения опасности поражения током. Упрощенная структурная схема алгоритма работы МП системы приведена на рис. 26.

Применение МП послужило фактором, стимулирующим появление большого количества разнообразных электронных игр, характерных, прежде всего, высокой степенью «интеллектуальности». Наибольшее распространение получили игры, выполненные в виде приставок к телевизору, подсоединяемых к его антенному входу. Игровым полем служит экран телевизора, на котором формируется изображение неподвижных и подвижных объектов, управляемых играющими со специальных пультов ввода. Условия игры и конфигурация объектов на экране могут быть заданы при помощи сменных модулей, основу которых составляет ПЗУ.

Таким образом, обращение с подобными играми приобретает характер обращения с проигрывателем — за относительно высокую цену покупается основная система, а игровые возможности расширяются путем приобретения недорогих сменных модулей. Например, так организована первая программируемая игровая система VES фирмы «Фейрчайлд» выпускаемая с 1976 г. [21]. В основной комплект входят две игры — «Теннис» и «Хоккей», кроме того, могут добавляться сменные модули для самых разных игр — от «Крестиков-ноликов» до «Космического состязания». Основу игровой системы составляет МП F-8 фирмы «Фейрчайлд». Управление подвижными объектами на экране в этой системе осуществляется при помощи двух выносных устройств, снабженных ручками управления.

Игровая система Studio II фирмы «Эр Си Эй» в отличие от предыдущей управляется с клавишных пультов и имеет более развитые «интеллектуальные» возможности. Клавиши служат для задания условий и для самой игры. Кабель, соединяющий системы с антенным входом телевизора, одновременно служит для подачи в блок питающего напряжения.

Система позволяет с помощью клавиатуры выбирать программы пяти различных игр. Одна из программ дает возможность рисовать на экране телевизора любые картинки, стирать и исправлять рисунки. Вто-

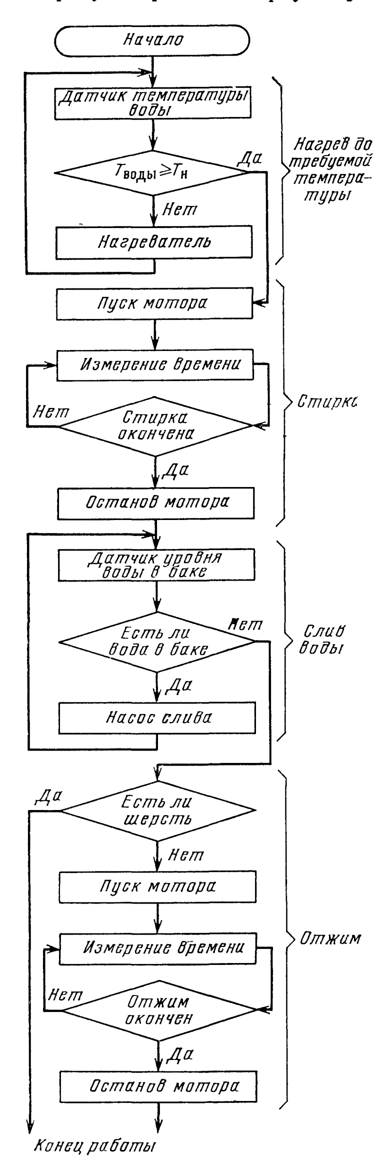


Рис. 26. Блок-схема алгоритма работы МП системы управления стиральной машиной.

рая программа имитирует автомобильные гонки, создавая опасные ситуации, которых необходимо избежать, причем момент возникновения и характер опасности непредсказуемы заранее. Третья программа организовывает кегельбан, а две остальные — игры на быстроту реакции и развитие навыков счета и обращения с устройством ввода графической информации.

Состав игр можно менять путем замены специальных кассет, поступающих в широкую продажу. Игровая система построена на базе МП COSMAC фирмы «Эр Си Эй» и содержит помимо него всего четыре БИС.

Наряду с созданием программируемых телевизионных игр использование МП позволяет расширить возможности нетелевизионных активных игр. К таким можно отнести, например, шахматный тренажер фирмы «Фиделити», использующий МП 8080А фирмы «Эн И Си» (Япония) и заменяющий соперника средней квалификации [22]. Игровая система совмещена с шахматной доской. При помощи клавишного пульта в систему вводится сделанный ход, на что она реагирует отображением ответного хода на цифровом табло.

Заканчивая описание конкретных применений МП систем, необходимо еще раз подчеркнуть, какую важную роль для массового внедрения играет их стоимость, снижающаяся по мере освоения МП в крупносерийном производстве. Фактически применение МП систем становится целесообразным почти везде, где их стоимость оказывается примерно на порядок ниже, чем стоимость самого изделия, что и дает основания надеяться на повсеместное использование МП в недалеком будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Merrit Rich.** Microprocessor user survey results. — Instrumentation Technology, 1976, vol. 23, № 4, p. 34—40.

2. **Blomeyer-Bartenstein H. P.** Microprocessors key of the equipment generation tomorrow. — Components report, 1976, vol. 11, № 2, p. 33—36.

3. **Гринкевич В. А.** Принципы структурной организации унифицированной элементной базы и средств обработки данных на основе БИС. — Приборы и системы управления, 1978, № 6, с. 3—7.

4. **Хилбурн Дж., Джулич П.** Микро-ЭВМ и микропроцессоры: Пер. с англ./ Под ред. С. Д. Пашкеева. — М.: Мир, 1979.

5. **Fullagar D.** Getting microprocessor into perspective. — Electronic Engineering, 1976, vol. 48, № 580, p. 61—63.

6. **Micropocesadores** y microcomputadores, 1976, Barcelona.

7. **Глазов Г. Я., Дризовский Л. М., Кореннов Е. Ф.** Опыт разработки и применения микропроцессоров: Обзор. — Приборы и системы управления, 1977, № 8, с. 18—21 и 9, с. 15—18.

8. **Harruson P.** The impact of the microprocessor. — Data Processing, 1975, vol. 17, № 3, p. 214—216.

9. **Прангишвили И. В.** Современное состояние и пути развития микропроцессоров и микро-ЭВМ. — Измерение, контроль, автоматизация, 1977, вып. 1 (9), 2 (10).

10. **Хвостанцев М. А.** Микропроцессоры и системы обработки данных: Обзор. — Зарубежная радиоэлектроника, 1975, № 9, с. 31—60.

11. **Kornstein H.** Third generation microcomputers. — Microelectronic and Reliability, 1977, vol. 16, № 4.

12. **Logan J., Kreager P.** Using a microprocessor: a real life application. — Computer Design, 1975, vol. 14, № 9, p. 69—77.

13. **Ауслендер Д. М., Такахаси Я., Томидзука М.** Применение микропроцессоров для прямого управления процессами и алгоритмы для контроллеров на микропроцессорах. — ТИИЭР, 1978, том 66, № 2, с. 113—124.

14. **Banks M.** MPU's — a present and a future. — Electronic Equipment News, 1976, № 12, p. 20—21.

15. **David N. Kaye.** Microprocessors help to communicate by voice and oil stream. — Electronic Design, 1976, № 8, p. 58—61.

16. **John R.** Francis microprocessor boosts radiotelephone service. — Communication News, August 1977.

17. **Мелвин Д. К.** Использование микро-ЭВМ в телефонии. — ТИИЭР, 1978, том 66, № 2, с. 91—103.
18. **Микропроцессоры** в новейшей военной аппаратуре связи. — Электроника, 1977, № 22, с. 15.
19. **Цифровой** вольтметр с микропроцессором. — Электроника, 1977, № 14, с. 17.
20. **Первый** осциллограф с микропроцессором. — Электроника, 1975, № 2, с. 85.
21. **Руссо П. М.** Микропроцессоры в товарах широкого потребления. — ТИИЭР, 1978, том 66, № 2, с. 25—37.
22. **Шахматный** спарринг-партнер. — Электроника, 1976, № 5, с. 11.

ОГЛАВЛЕНИЕ

БЕДРЕКОВСКИЙ МИХАИЛ АЛЕКСЕЕВИЧ
КРУЧИНКИН НИКОЛАЙ СЕРАФИМОВИЧ
ПОДОЛЯН ВЛАДИМИР АНДРЕЕВИЧ

МИКРОПРОЦЕССОРЫ

Редактор **В. С. Темкин**

Редактор издательства **И. Н. Суслова**

Обложка художника **В. Д. Козлова**

Технический редактор **Т. Н. Зыкина**

Корректор **Н. В. Козлова**

ИБ № 2632 (Энергия)

Сдано в набор 29.01.81 г. Подп. в печ. 24.03.81 г.
Т-00796 Формат 60×90/16 Бумага тип. № 1 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 4,5 Уч.-изд. л. 6,64 Усл. кр.-отт. 4,875
Тираж 60 000 экз. Изд. № 19437 Зак. № 14 Цена 50 к.
Издательство «Радио и связь», Москва, 101000, Главпочтамт, а/я 693

Типография издательства «Радио и связь» Госкомиздата СССР
Москва 101000, ул. Кирова, д. 40

ГОТОВЯТСЯ К ВЫПУСКУ В СВЕТ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «РАДИО И СВЯЗЬ»

50 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО "РАДИО И СВЯЗЬ"